

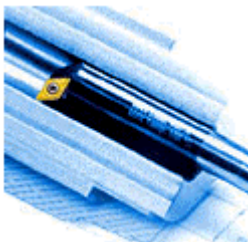
FABRICATION MECANIQUE



Année 2004-2005
Philippe DEPEYRE

Chapitre 1

Usinage par enlèvement de matière



Sommaire

.1. Généralité sur l'usinage.....	5
.2. Les machines	5
.2.1. Le fraisage.....	6
.2.2. Le perçage.....	8
.2.3. Le tournage	8
.3. Les matériaux des outils	11
.3.1. Matériaux	11
.3.2. Choix du matériaux des plaquettes.....	13
.4. Contrôle de la position de la pièce par rapport à l'outil.....	14
.4.1. Les moyens de contrôle.....	14
.4.2. Référentiels	14
.5. La formation des copeaux	15
.5.1. Généralité dans le cas du tournage.....	15
.5.2. Les différents types de copeaux	16
.5.3. Evolution du copeau en fonction de V_c	16
.5.4. Evolution du copeau en fonction de sa section	17
.5.5. Angles d'outil.....	18
.6. Usure des outils	20
.6.1. Phénomènes d'usure	20
.6.2. Manifestation de l'usure.....	21
.6.3. Durée de vie	21
.7. Conditions de coupe.....	23
.7.1. Les paramètres de coupe	23
.7.2. Choix des paramètres de coupe.....	24
.7.3. Influence des conditions de coupe sur la rugosité.....	24
.7.4. Optimisation des conditions de coupe.....	25

.1. Généralité sur l'usinage

L'usinage par enlèvement de matière est le moyen le plus fiable pour obtenir des pièces de précision, à partir de pièces moulées, extrudées ou forgées.

Le procédé est, par contre, coûteux (machine, outils, hommes qualifiés) et relativement lent.

C'est pourquoi on essaye d'obtenir maintenant des pièces de moulage ne nécessitant pas d'usinage. Cela est possible avec le plastique ou le Zamac (Zn, Al, Mg), mais les qualités techniques : résistance à la chaleur ou limite élastique sont encore loin d'égaler celles de l'acier ou des alliages d'aluminium.

Actuellement parmi tous les axes de recherche en fabrication, on peut en citer deux : l'UGV (ou usinage à grande vitesse) et les machines à axes parallèles qui offrent une grande mobilité de la tête d'usinage.

- Avec le travail à grande vitesse, la machine-outil passe à la vitesse supérieure.

La pièce usinée par UGV est d'une précision supérieure. Tout d'abord, les efforts de coupe sont réduits. Donc, la pièce subit moins de déformation. Ensuite, les calories sont dissipées dans les copeaux avant d'avoir le temps de pénétrer dans la pièce. Moins sollicitée en température, la pièce conserve sa stabilité dimensionnelle originelle.

L'état de surface de la pièce à usiner est amélioré par l'écoulement plastique du matériau dans la zone de cisaillement. L'augmentation du débit des copeaux autorise une meilleure productivité, qui peut être multipliée par un facteur de 3 à 10.

Enfin, l'UGV autorise l'usinage de pièces qu'il était impossible d'usiner auparavant avec les moyens conventionnels (comme les voiles minces en aéronautique, par exemple).

- Après avoir développé l'usinage à grande vitesse (UGV), les industriels se concentrent aujourd'hui sur le travail à grande vitesse.

Avec l'apparition de l'UGV, le secteur de la machine-outil a tourné une page de son histoire et entamé une irréversible évolution. Les pièces sont désormais usinées très rapidement, avec une précision toujours croissante. Seulement, l'usinage ne représente que 15 % du temps du cycle total de production.

Changement d'outils, acheminement de la pièce, positionnement broche/outil, évacuation de la pièce, etc. Pour une performance maximale, le centre d'usinage doit prendre en compte, non seulement le temps d'usinage proprement dit (temps copeau), mais également - et surtout - le temps hors usinage, qui représente à lui seul les 85 % restants du temps du cycle total de production. Aujourd'hui, l'UGV a laissé la place au travail à grande vitesse dans la liste des priorités des constructeurs de machines-outils.

.2. Les machines

Les machines sont classées en deux catégories :

Fraisage : L'outil tourne, la pièce se déplace par rapport à l'outil. Cela permet de réaliser des formes planes, des moules...

Tournage : La pièce tourne, l'outil se déplace par rapport à la pièce : pour réaliser des pièces de révolution.

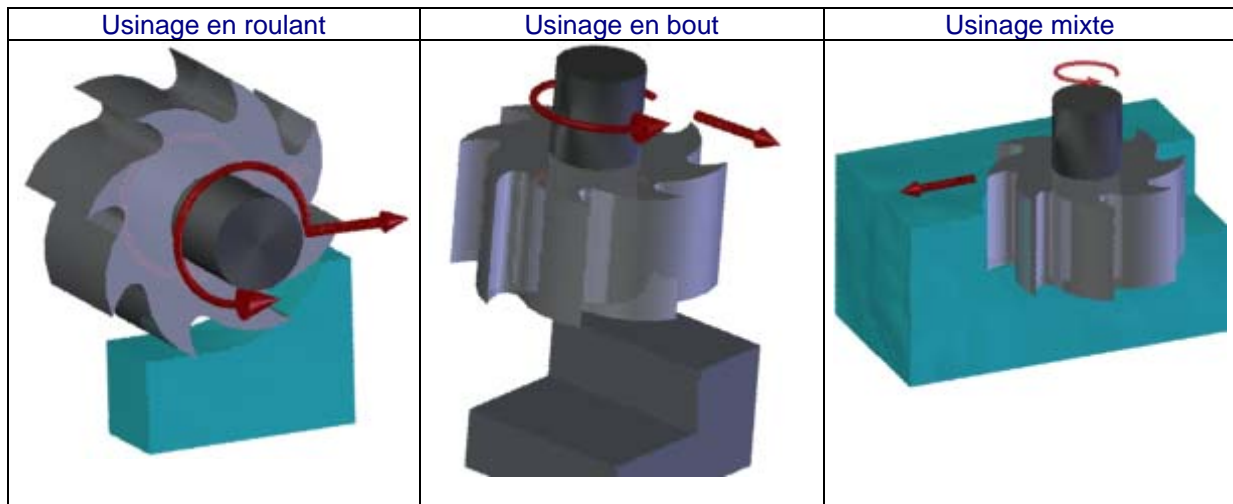
Bien entendu, des industriels fabriquent des tours, où les outils peuvent tourner, ou des centre de fraisage où les pièces peuvent être entraînés en rotation... ce sont des machines hybrides, mixtes, ou machine multi-axe.

.2.1. Le fraisage

Dans le cas du fraisage : l'outil tourne, la pièce se déplace. Les centre de fraisage comportent généralement 3 axes (que l'on peut commander individuellement pour faire des formes complexe : hélices...) et un plateau tournant pour présenter toutes les faces de la pièce devant la broche.

On peut aussi imaginer de monter l'outil au bout un bras de robot. Voir exemple ci-contre.

L'outil tourne, la pièce se déplace par rapport à l'outil. Cela permet de réaliser des formes planes, des moules...



.2.1.1. Fraiseuses



Centre de fraisage à axe vertical. On voit le changeur d'outil sur la gauche.


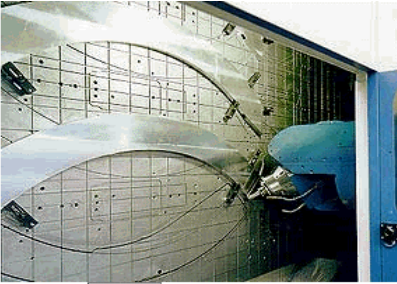


Centre de fraisage 5 axes Willem. La broche peut pivoter autour de l'axe X et de l'axe Y.

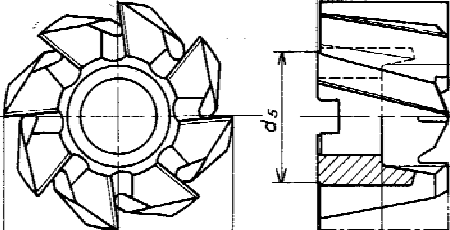

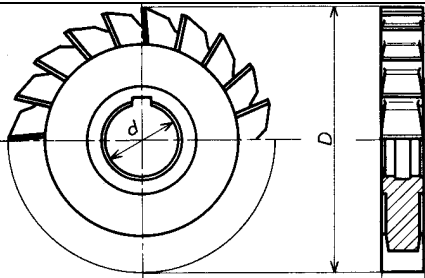
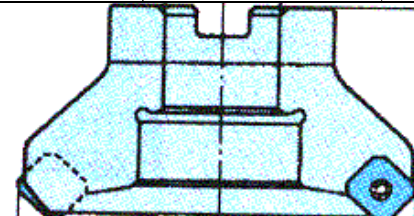


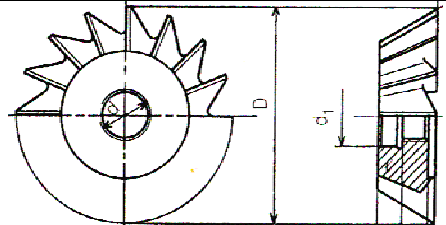
Double tête de fraisage pour usiner les maquettes de voiture en résine



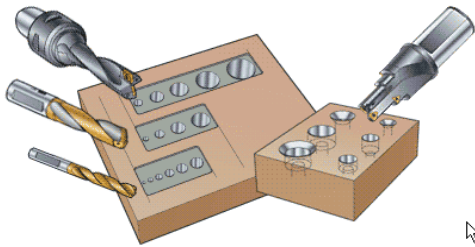
 <p>Fraiseuse à broche horizontale</p>	<p>Fraiseuse grande capacité sur portique</p>  <p>fraisage avec un bras de robot</p>
---	--

.2.1.2. Les outils de fraisage

Fraise deux tailles ARS	Usinages de plans. La fraise est en ARS. Cette fraise, une des plus courante, est remplacée par des fraises carbure.	
Fraise deux tailles à plaquettes rapportées	Fraise carbure, de défonçage. Cette fraise permet des ébauches rapides, mais ne permet pas de plonger dans la matière (pas de « coupe au centre »)	
Fraise 3 tailles	Fraise pour usiner les rainure. 3 plans sont usinés dans une seule passe.	
Fraise à surfacer	Fraise carbure à surfacer pour usiner des grands plans.	

Fraise conique de forme	Fraise de forme pour usiner des rainure de queue d'aronde.	
-------------------------	--	--

.2.2. Le perçage

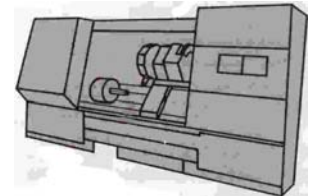


Le perçage est une forme de fraisage avec une caractéristique particulière : l'outil doit plonger dans la matière. Il faut donc qu'il soit capable de couper au centre (zone où la vitesse de coupe est nulle).

Le foret le plus courant est en ARS, il peut être revêtu d'une couche de carbure (couleur or), mais il existe des fraises à percer, l'arête de coupe étant formée de deux plaquette se chevauchant au centre, afin de pouvoir couper le centre du trou.

.2.3. Le tournage

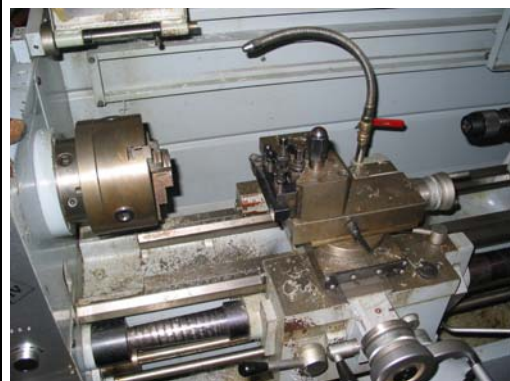
La pièce tourne, l'outil se déplace par rapport à la pièce ; Cette opération permet de réaliser des pièces de révolution.



.2.3.1. Les machines de tournage



Tour conventionnel



Détail du tour conventionnel : on voit la broche à gauche et le trainard sur lequel est monté l'outil.



Tour à commande numérique

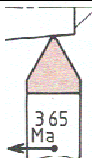
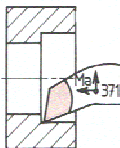

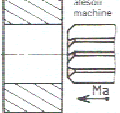
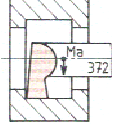
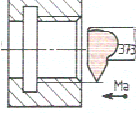


.2.3.2. Les outils de tournage








On choisit la forme de l'outil en fonction de l'opération à effectuer (ébauche ou finition) et de la forme de la pièce à réaliser.

.2.3.2.1. Outils ARS

Outil	Norme	Silhouette outils ARS
Outil à dresser d'angle	NFE 66 364	
Outil couteau	NFE 66 363	
Outil à fileter	NFE 66 369	
Outil à saigner	NFE 66 367	
Outil à charioter	NFE 66 362	
Outil pelle	NFE 66 366	

Outil à retoucher	NFE 66 365	
Outil à aléser - dresser		
Foret		
Alésoir		
Outil à chambrer		
Outil à fileter intérieur		

.2.3.2.2.Outil carbure

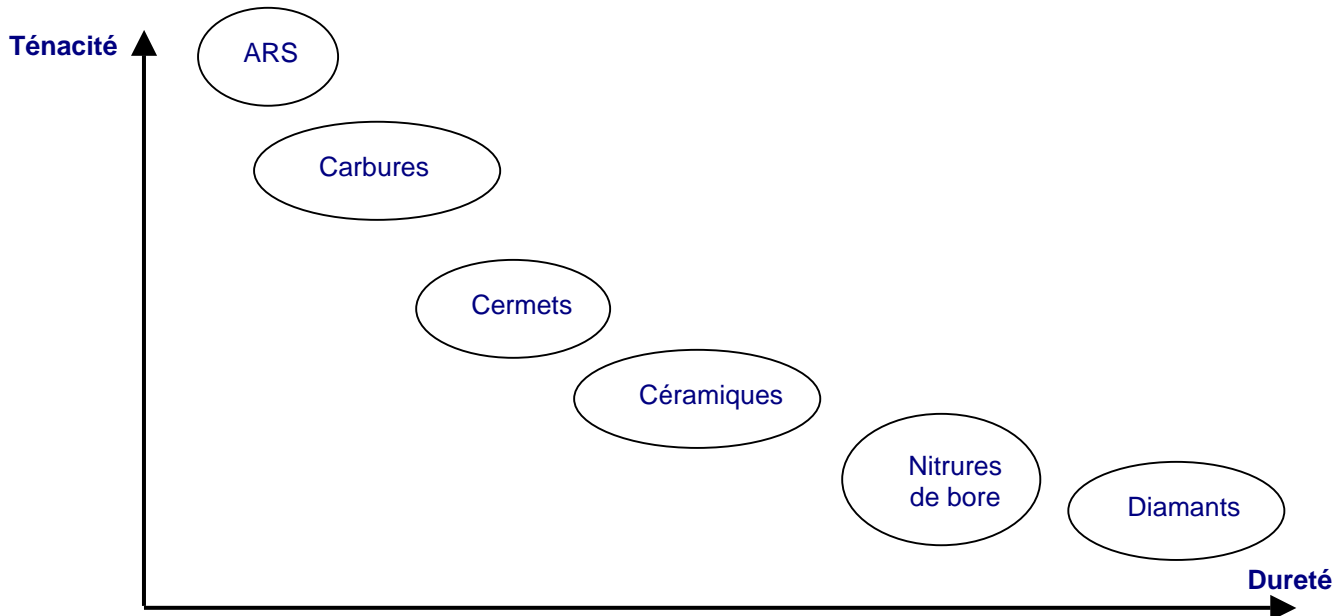
	Negative inserts				Positive inserts	Ceramic and CBN inserts	
Tooling system	CoroTurn RC	T-MAX P			CoroTurn 107	CoroTurn RC	T-MAX
Clamping system	 Rigid clamp design	 Lever design	 Wedge clamp design	 Screw and top clamp design	 Screw clamp design	 Rigid clamp design	 Top clamp design
Longitudinal turning/facing	**	*	*		*	**	*
Profiling	**	*	*	*	**	**	*
Facing	**	*	*	*	*	**	*
Plunging		*			**		**

Plaquettes carbure



.3. Les matériaux des outils

.3.1. Matériaux



.3.1.1. ARS

Les outils ARS (Acier Rapides Supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier faiblement allié subissant un traitement thermique. Il est toujours utilisé pour certains types d'outils comme les forets, ou les outils nécessitant un angle de tranchant très faible.

Ils ne permettent pas une vitesse de coupe élevée car un échauffement trop important élimine la trempe de l'outil, et crée donc un effondrement rapide de l'arête de coupe.

Fabrication : par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres

Composition : 0,7 % de Carbone minimum
4 % de Chrome environ

Tungstène, Molybdène, Vanadium
Cobalt pour les plus durs.

Dureté : de 63 à 66 Hrc

.3.1.2. Carbures

Les outils carbures sont les plus utilisés actuellement. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on vient fixer sur un porte outil. Le remplacement de la plaquette est donc très rapide.

Ils sont souvent revêtus d'un carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure.

Fabrication : par frittage de poudre, puis revêtement

Composition : Noyau en carbure de tungstène (T° de fusion 2600°)
Ou en carbure de titane (3100°), ou tantale (3780°) ou niobium (3500°)
Liant : cobalt : le plus courant ou nickel.

Revêtement en oxyde d'aluminium (céramique appelée corindon : Al_2O_3)

.3.1.3. Cermets

Ce nom vient de céramique-métal car il représente les carbures ayant des particules de Titane, de carbonitrure de Titane ou de nitrure de Titane.

Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité.

Ils sont utilisés pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances, donc pour de la finition.

Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...).

.3.1.4. Céramiques

Ce sont, pour les outils de coupe, les oxydes et les nitrures : oxyde d'aluminium et nitrure de silicium.

Les céramiques ont une grande dureté (donc une faible ténacité) avec une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée.

Les céramiques permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée (approche de l'outil).

.3.1.5. Nitrure de Bore Cubique (CBN)

Le CBN offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Il est aussi utilisé pour faire des meules de rectification, pour usiner les pièces dures...

Son utilisation requiert

- Une machine stable
- Une grande rigidité de la pièce et du porte pièce
- Un arrosage

.3.1.6. Diamant

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de ré-affûtage des meules.

Il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassement).

Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650 ° se transforme en un vulgaire morceau de graphite... On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux.

Par contre, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables...

3.2. Choix du matériaux des plaquettes

	Tournage	Fraisage	Perçage
P01	GC4015 Finition et ébauche légère de l'acier et l'acier coulé. Grande résistance à l'usure et bonne résistance à la déformation plastique, autorisant des taux d'enlèvement de matière élevés.	CT530 Nuance cermet pour fraisage léger. Fraisage à sec et sous arrosage. Haute résistance à la déformation plastique et à la formation d'arêtes rapportées.	GC1020 Choix de base comme plaquette centrale. Excellente également à la périphérie avec des vitesses de coupe faibles à modérées.
P10			
P20		GC4030 Fraisage finition à ébauche, à sec ou sous arrosage, de matières jusqu'à 300 HB. Vitesses de coupe moyennes à élevées.	GC1120 Choix de base pour les plaquettes périphériques dans la plage de diamètre de 12,7-17 mm. Vitesses de coupe faibles à modérées.
P30	GC4025 Ébauche légère et moyenne de l'acier et l'acier coulé. Vitesses de coupe moyennes à élevées pour des avances relativement élevées.	GC235 Fraisage semi-finition à ébauche. Convient pour opérations exigeant une grande ténacité. Vitesses de coupe modérées.	GC4025 Choix de base pour les plaquettes périphériques avec des vitesses de coupe élevées. Bonne résistance à l'usure et sécurité d'arête dans les aciers à teneur en carbone faible à moyenne.
P40	GC4035 Ébauche légère à moyenne de l'acier et l'acier coulé, en conditions défavorables. Vitesses de coupe et avances moyennes.		
P50			
M10	GC2015 Finition et ébauche légère de l'acier inoxydable en conditions relativement favorables. Moindre tendance à la formation d'arêtes rapportées. Vitesses de coupe moyennes à élevées.	CT530 Nuance cermet pour fraisage finition. Haute résistance à la déformation plastique et à la formation d'arêtes rapportées. Plage étendue de vitesses de coupe.	GC1020 Excellente ténacité d'arête et résistance à la formation d'arêtes rapportées. Pour plaquettes périphériques et centrales. Convient pour les alliages réfractaires.
M20			GC1120 Choix de base pour les plaquettes périphériques dans la plage de diamètre de 12,7-17 mm. Mêmes caractéristiques que GC1020.
M30	GC2025 Choix de base pour l'acier inoxydable. Semi-finition à ébauche légère d'acier inoxydable austénitique ou duplex. Vitesses de coupe moyennes. Bonne sécurité d'arête.	GC235 Fraisage semi-finition à ébauche en conditions instables. Vitesses de coupe moyennes à faibles.	
M40	GC2035 Ébauche de l'acier inoxydable en conditions favorables avec des vitesses de coupe inférieures à 130 m/min.	GC1025 Fraisage de finition de l'acier inoxydable. Choix de base pour matières collantes et écrouissables.	
K01	GC3005 Optimisation pour l'usinage de la fonte nodulaire.	GC3020 Fraisage semi-finition à ébauche, surtout à sec. Vitesses de coupe moyennes à élevées.	GC1020 Choix de base pour les opérations exigeant une grande ténacité. Très bonne nuance de plaquette centrale.
K10	GC3015 Choix de base pour la semi-finition et l'ébauche. Débit important d'enlèvement de métal. Autorise des vitesses de coupe élevées.	GC3040 Pour opérations exigeant une bonne ténacité, avec des vitesses de coupe faibles à moyennes. Fraisage sous arrosage.	GC1120 Choix de base pour les plaquettes périphériques dans la plage de diamètre de 12,7-17 mm. Mêmes caractéristiques que GC1020.
K20	GC3025 Convient pour de mauvaises conditions de stabilité avec des vitesses de coupe modérées.	H13A Choix de base pour le fraisage de la fonte nodulaire ferritique. Fraisage léger à moyen. Vitesses de coupe modérées.	GC4025 Choix de base comme plaquette périphérique pour la fonte. Haute sécurité d'arête et bonne résistance à l'usure. Vitesses de coupe jusqu'à 300 m/min.
K30			

.4. Contrôle de la position de la pièce par rapport à l'outil

.4.1. Les moyens de contrôle

Le moyen le plus simple est le vernier : tambour gradué sur lequel on lit les déplacements de l'outil. C'est l'opérateur qui contrôle la position de l'outil, et qui arrête l'avance de l'outil lorsque la position est atteinte. Ces machines s'appellent les **machines conventionnelles**. Les pièces fabriquées sont limitées à des formes simples. Ces machines sont de plus en plus rares dans l'industrie, car elles sont peu productives. On les trouve dans les ateliers de réparation.

La machine la plus courante est la **machine à commande numérique**. Un codeur permet de connaître la position de l'outil, et une boucle d'asservissement permet de contrôler l'alimentation des moteurs d'avance pour atteindre la position désirée. Ces machines nécessitent donc une programmation pour être mises en œuvre, mais la programmation devient de plus en plus transparente grâce aux logiciels de FAO (fabrication assistée par ordinateur) qui génèrent le programme à partir du fichier CAO de la pièce, ou grâce à une nouvelle génération de machines dites « par apprentissage ».

.4.2. Référentiels

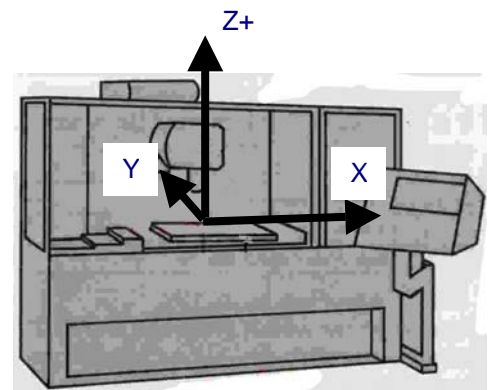
Les machines étant dirigées par un programme, il est important d'avoir une définition commune des références et des axes.

L'**axe Z** est toujours l'axe tournant. Z+ doit éloigner la pièce de l'outil :

- l'axe de rotation de l'outil en fraisage
- l'axe de rotation de la pièce (mandrin) en tournage

L'**axe X** est l'axe du plus grand déplacement

L'**axe Y** forme un repère direct avec X et Z



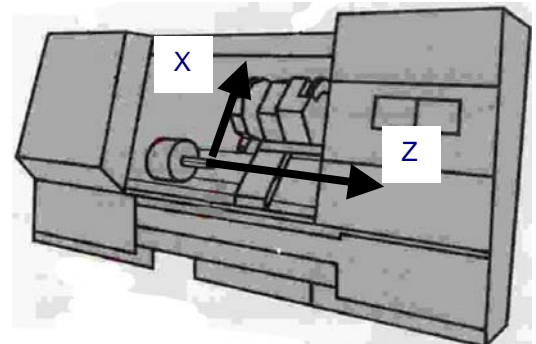
Remarques :

- En tournage l'axe Y n'existe pas. Deux déplacements suffisent à faire toutes les pièces à une révolution.

- Les axes supplémentaires et demi-axes.

Tous déplacements analogiques sont appelés **axe**. C'est à dire que la position relative entre la pièce et l'outil doit pouvoir varier de façon continue (outil tournant sur un tour, plateau tournant asservi ...)

Les mouvements incrémentaux sont appelés demi-axe (plateau tournant gradué tous les degrés).



.5. La formation des copeaux

.5.1. Généralité dans le cas du tournage.

Lors de la coupe, l'outil vient séparer le métal en deux. La facilité de la coupe, donc l'usure et la puissance nécessaire, dépend d'une série de paramètres :

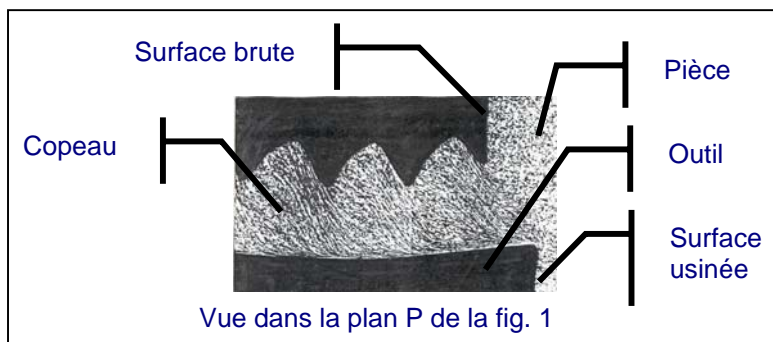
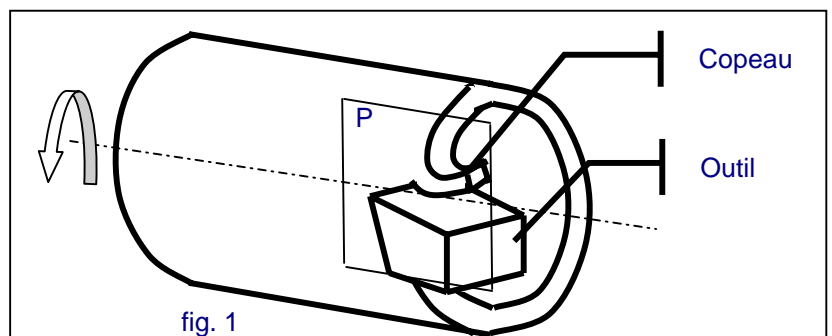
- les matériaux en présence,
- les angles de l'outil,
- la vitesse de coupe
- la section du copeau.

Pour trouver l'influence des différents paramètres sur l'usure des outils, Monsieur Taylor a usiné des kilomètres de barre d'acier. Nous verrons ses théories plus loin dans le cours.

Etude dans le cas du tournage.

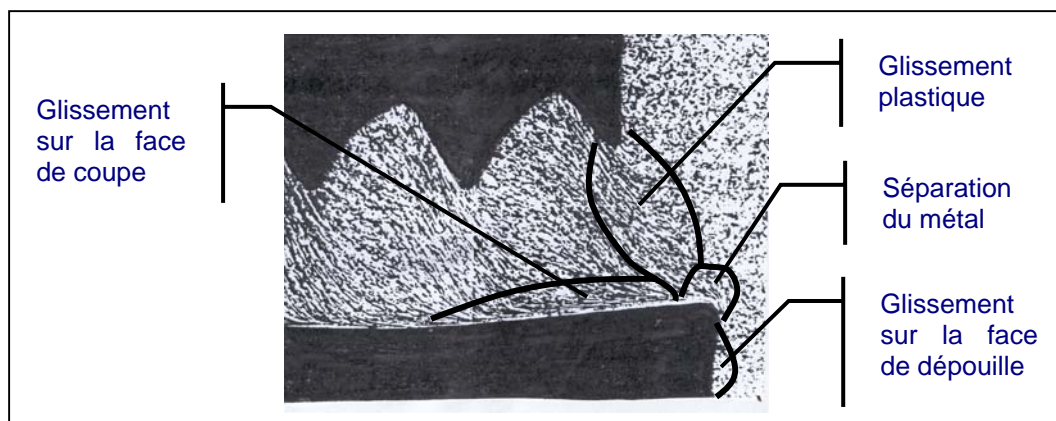
Lors de la séparation de la matière, le copeau glisse sur la **face de coupe** de l'outil.

Il y a une forte déformation plastique que l'on peut observer dans le plan P, parallèle à l'axe de rotation de la pièce, et passant par le milieu du copeau.






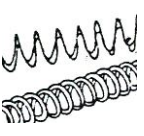
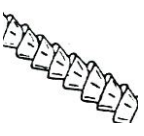

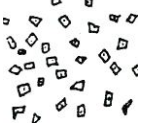

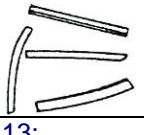
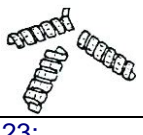

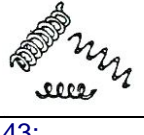
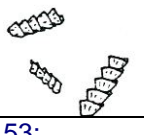
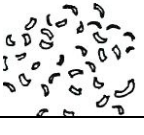
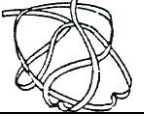
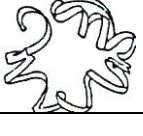
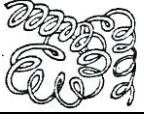
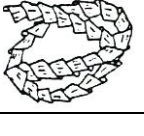
On observe, en faisant une coupe et une attaque chimique, le glissement plastique des filets qui sont parallèles entre eux, ainsi que la formation de vagues : le festonnage.

En affinant l'observation, on peut décomposer la formation du copeau en plusieurs zones.



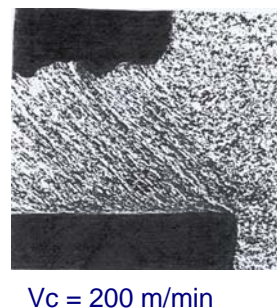
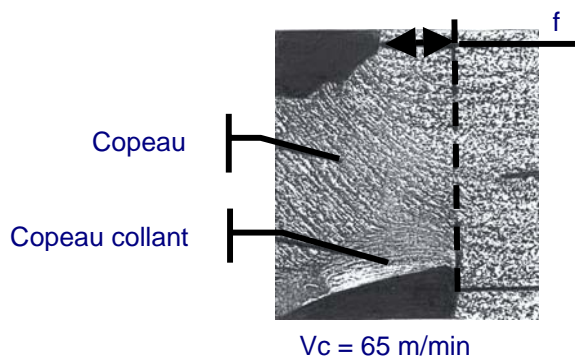
5.2. Les différents types de copeaux

Une norme existe pour classer les copeaux obtenus en usinage (NFE 66 505).

1 : copeau ruban	2 : copeau tubulaire	3 : copeau en spirale	4 : copeau hélicoïdal en rondelle	5 : copeau hélicoïdal conique	6 : copeau élémentaire	7 : copeau aiguille	8 : copeau en arc
11 : Long 	21 : Long 	32 : plat 	41 : Long 	51 : Long 	61 : Enchevêtré 		
12 : Court 	22 : Court 	32 : Conique 	42 : Court 	52 : Court 	62 : détaché 		
13: Enchevêtré 	23: Enchevêtré 		43: Enchevêtré 	53: Enchevêtré 			

5.3. Evolution du copeau en fonction de Vc

La vitesse de coupe influe fortement sur la formation du copeau. Une vitesse de coupe trop faible entraîne un copeau collant (ou arête rapportée). Une vitesse trop grande déclenche une usure accélérée de l'outil.

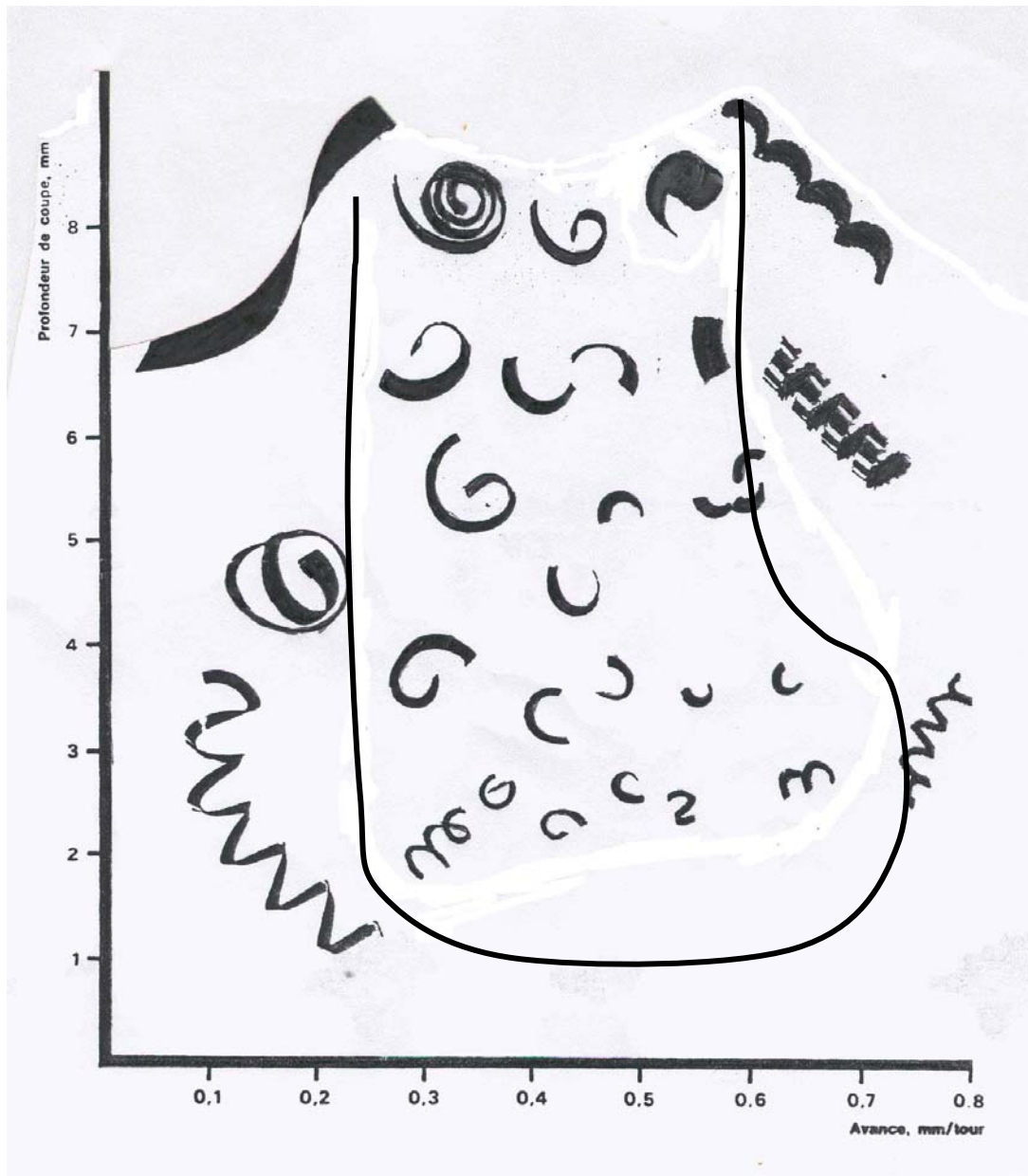


.5.4. Evolution du copeau en fonction de sa section

La forme du copeau influe sur l'usinage. En effet un copeau filant risque d'abîmer la surface usiner, et sera difficile à évacuer vers les bacs à copeaux.

Pour chaque forme d'outil, on peut établir un diagramme qui donne la forme du copeau en fonction de la vitesse d'avance et de la profondeur de passe.

La zone intéressante se situe au centre (forme de chaussette).



Lors de l'utilisation d'un nouvel outil, il est important de se reporter aux spécifications du fabricant de l'outil.

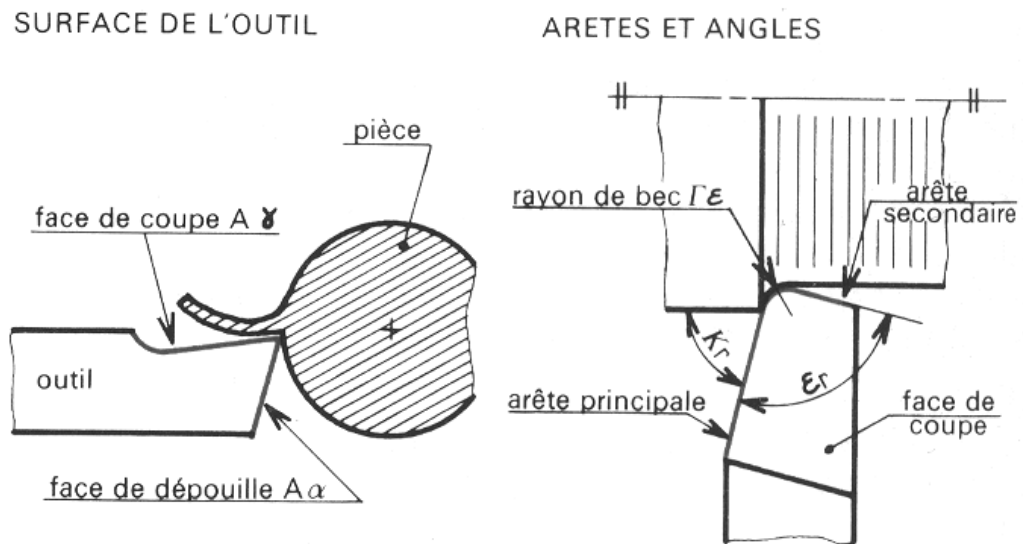
.5.5. Angles d'outil

Les angles d'outils sont définis dans deux références :

Référence outil en main : qui est utile pour la fabrication de l'outil et son affûtage !

Référence outil en travail : qui définit les angles de l'outil en fonction d'un repère lié à l'orientation du vecteur vitesse de coupe et vitesse d'avance !

.5.5.1. Géométrie de l'outil



.5.5.2. Définition des plans de l'outil

.5.5.2.1. Plan d'outil en main

Pr : plan contenant la face d'appui de l'outil.

Ps : plan tangent à l'arête et perpendiculaire à Pr

Po : plan contenant la vitesse de coupe théorique V_c au point de l'arête et perpendiculaire à Pr et perpendiculaire à Ps (attention Po est incliné par rapport à Vf).

Pn : plan perpendiculaire à Po et normal à l'arête.

Pf : plan perpendiculaire à Pr et parallèle à la vitesse d'avance Vf.

Pp : plan perpendiculaire à Pr et à Pf (cela donne une section de l'outil perpendiculaire au corps de l'outil)

Ces plans permettent de définir des systèmes d'angles en gardant toujours les dénominations de base :

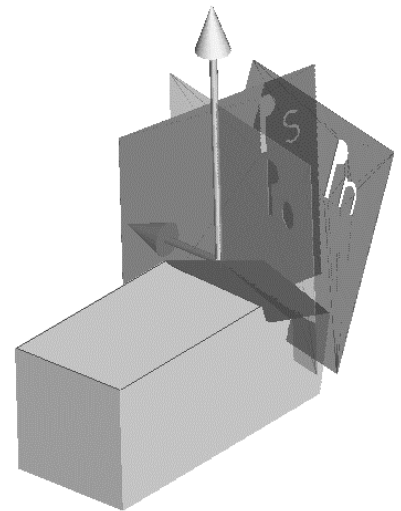
α : angle de dépouille principal

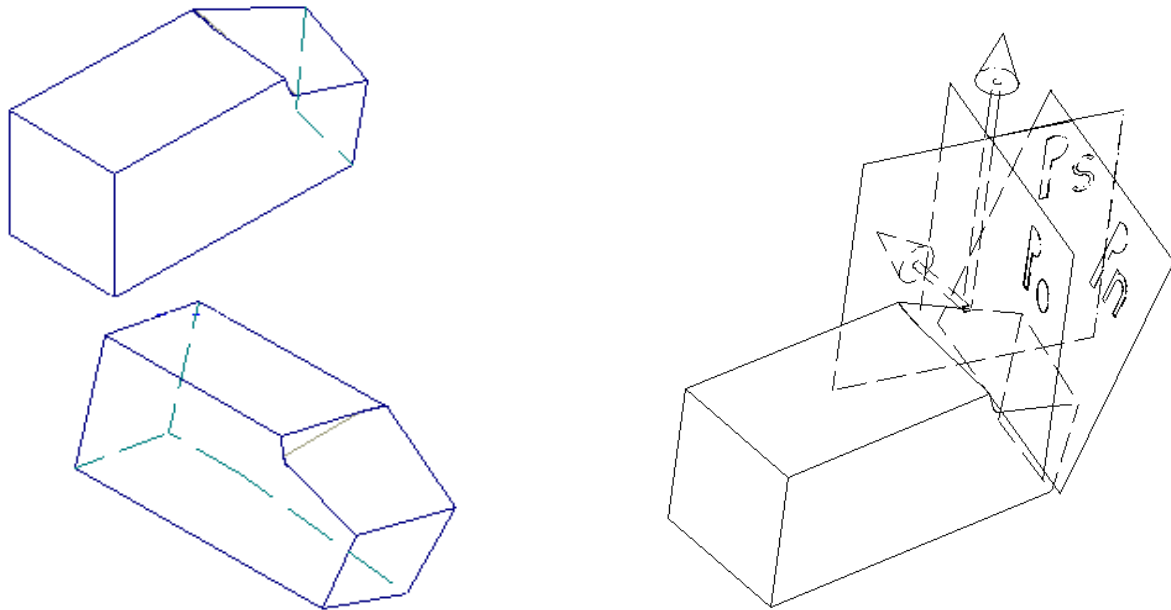
β : angle de taillant

γ : angle de coupe

ψ : angle de direction complémentaire de l'arête

Vus dans le plan Po : ces angles deviennent $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0 \dots$





.5.5.2.2. Plan d'outil en travail

Les angles en travail prennent en compte la vitesse de coupe effective : composition de V_c et V_f .

Les angles et les plans sont ensuite définis de la même façon en ajoutant un indice « e » aux angles.

Pre : plan perpendiculaire à la résultante de la vitesse de coupe .

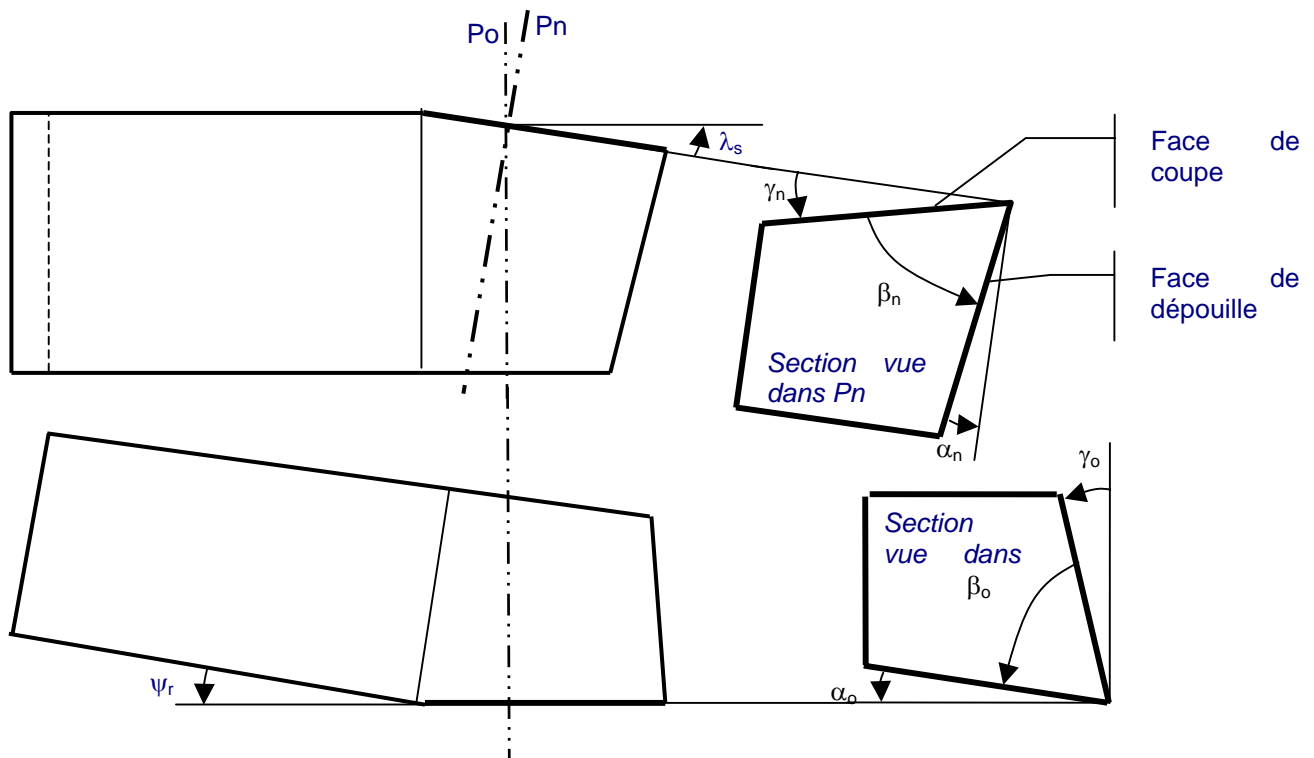
Poe : plan contenant la résultante de la vitesse de coupe au point de l'arête et perpendiculaire à Pre.

Pne : plan perpendiculaire à Poe et normal à l'arête.

Pse : plan tangent à l'arête et perpendiculaire à Pre

Pfe : plan perpendiculaire à Pre et parallèle à la vitesse d'avance V_f .

.5.5.2.3. Angles d'outil en main



.5.5.2.4. Les différents systèmes de mesure des angles

Système 1 : dans un plan de section orthogonal : Po (ou Poe)

Système 2 : dans un plan de section normal à l'arête : Pn (ou Pne)

Système 3 : angles latéraux vers l'arrière : dans le plan Pf et dans le plan Pp (ils sont orthogonaux l'un par rapport à l'autre).

Système 4 : angles d'affutage.

.6. Usure des outils

.6.1. Phénomènes d'usure

.6.1.1. Usure par effet mécanique

Usure adhésive (régie par l'équation de Burwell et Strang). Soit « Ar » surface réelle de contact, « Aa » surface apparente de contact, on peut avoir $Ar/Aa=10^{-5}$. Les pressions de contact sont donc très grandes et le risque d'avoir adhésion important.

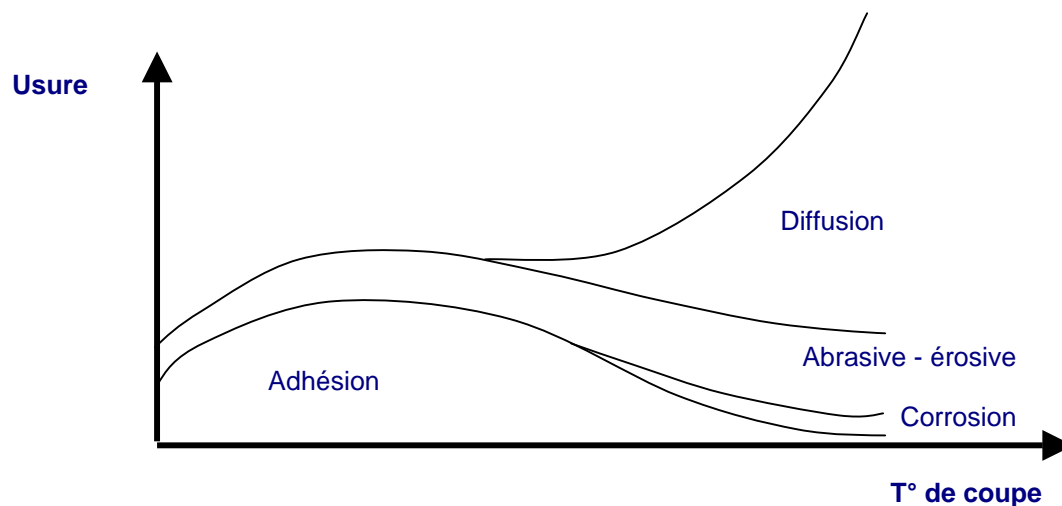
Usure abrasive (à sec) : les particules de métal se glissent entre l'outil et la pièce.

Usure érosive : même phénomène que précédemment, en présence d'un lubrifiant.

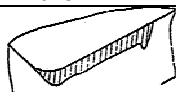
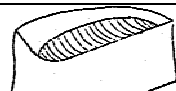





.6.1.2. Usure par effet physico-chimique

Usure corrosive : au contact de l'air, d'un lubrifiant, à haute température. Transfert des particules de l'outil vers le copeau.

Usure par diffusion : apparaît pour des vitesses élevées.



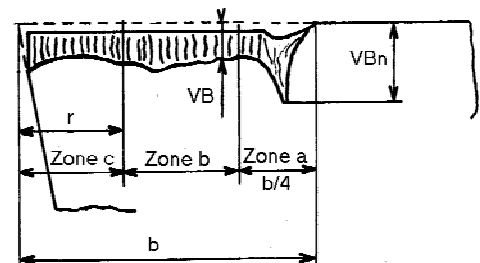
.6.2. Manifestation de l'usure

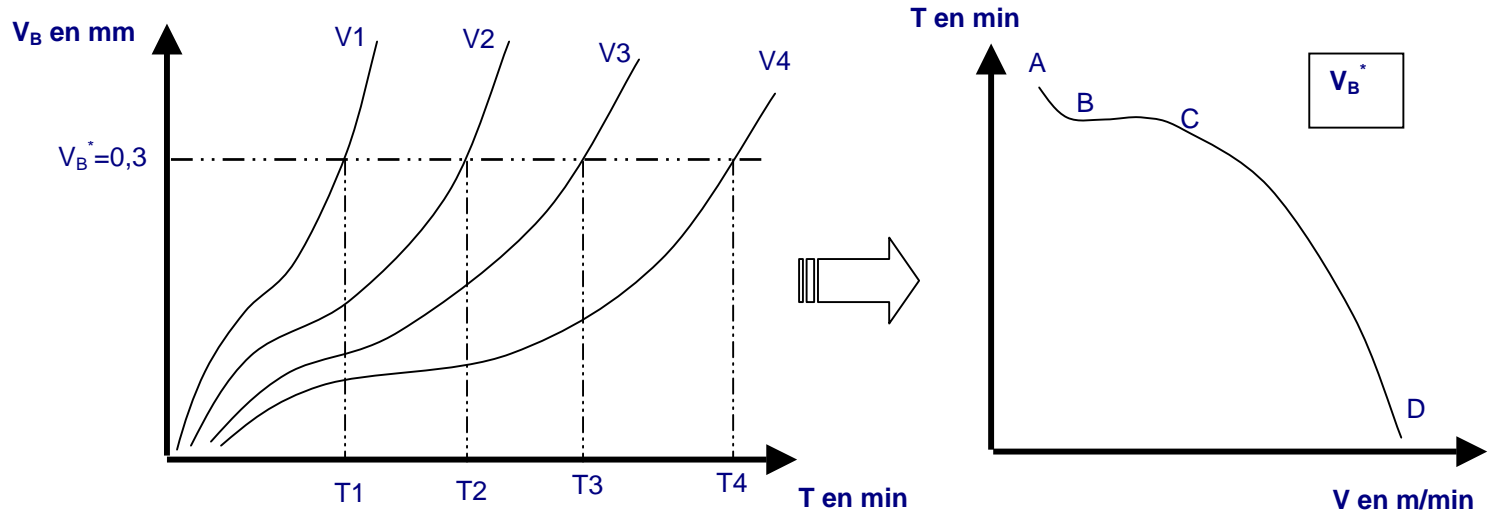
Nom	Allure	Effets	Cause	Remède
Usure en dépouille V_B		L'usure en dépouille est la plus importante. Elle influence directement la cote fabriquée, et l'état de surface.	V_c trop important.	Réduire V_c ou changer de nuance de plaquette. Revêtement Al_2O_3 (Pour les matériaux réfractaires avec des plaquettes céramiques, il faut au contraire augmenter V_c)
Usure en cratère		Elle entraîne une fragilité de l'arête. Lorsque l'usure a progressé jusqu'à l'arête secondaire, l'état de surface devient médiocre.	Usure par diffusion due à une température trop importante sur la face de coupe.	Choisir une plaquette avec un γ positif. Prendre une plaquette revêtue. Réduire V_c puis V_f .
Déformation plastique (fluage)		L'arête de coupe s'est déformée entraînant une dépression de l'arête et un renflement sur la face de dépouille.	Efforts de coupe trop importants. Température de coupe trop importante	Lubrifier. Réduire V_f Réduire V_c
Ecaillage		Petite fracture entraînant un état de surface médiocre et une usure en dépouille excessive.	Nuance trop fragile Géométrie trop fragile Arête rapportée	Prendre une nuance tenace. Augmenter β et le chanfrein de bec. Réduire l'avance au début de la coupe.
Usure en peigne		Des fissures perpendiculaires à l'arête entraînent son effritement.	Elle est due à des fluctuations thermiques lors de l'usinage : Arrosage intermittent Usinage intermittent.	Sélectionner une nuance tenace offrant une bonne résistance aux chocs thermiques. Pratiquer un arrosage abondant ou usiner à sec.
Arête rapportée		Un copeau se dépose sur la plaquette, entraînant un état de surface médiocre.	V_c trop faible Géométrie mal adaptée au matériau	Augmenter V_c . Revoir les catalogues (cas de l'inox, de certains aluminium)
Rupture		Risque d'endommager la pièce, le porte outil.	Nuance trop fragile. Charge excessive sur la plaquette. Choc lors de l'usinage (plan de joint).	Prendre une nuance tenace. Réduire V_f et a . Dans ce cas : augmenter la profondeur de passe pour absorber le choc.

.6.3. Durée de vie

La durée de vie est mesurée sur l'usure en dépouille : dans la zone b : V_B en mm.

On adopte comme critère d'usure $V_B^* = 0.3$.



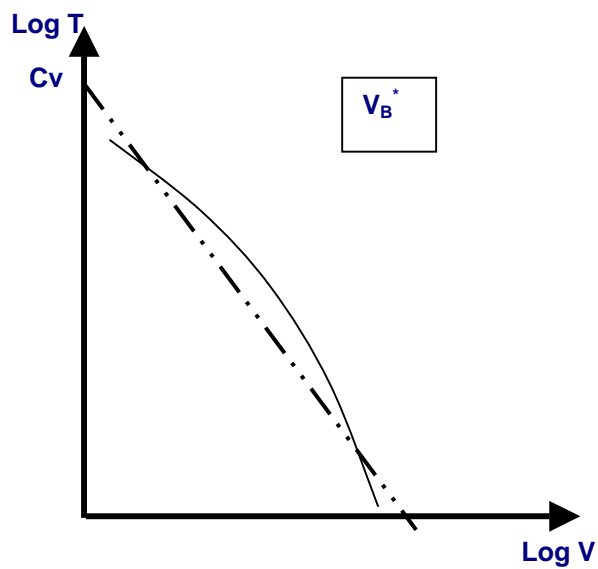
.6.3.1. Modèle de Taylor (1907)

AB - Forte usure : stabilisation

BC - Usure constante

CD - Usure accélérée

En gardant uniquement la partie CD sur une feuille log,



$$T = C_v V^n$$

avec C_v et n constant.

La durée de vie est donnée pour une usure $V_B^* = 0.3$ mm

Remarque : « n » négatif.

.6.3.2. Autres modèles

Modèle de Gilbert (1950) (ou Taylor généralisé)

Il prend en compte l'influence de l'avance et de la profondeur de passe : $T = C_v \cdot s^x \cdot a^y \cdot V^n$

Modèle de Kronenberg (1968)

Il donne une vitesse finie pour une durée de vie nulle : $T + K = C_1 \cdot V^n$

Modèle de Köning – Depiereux (1969)

Modèle très proche des résultats expérimentaux mais nécessitant des moyens de calculs importants : $T = e^{(-\alpha V^\gamma - \gamma s^\mu - \delta a^\lambda)}$

.7. Conditions de coupe**.7.1. Les paramètres de coupe****Tournage**

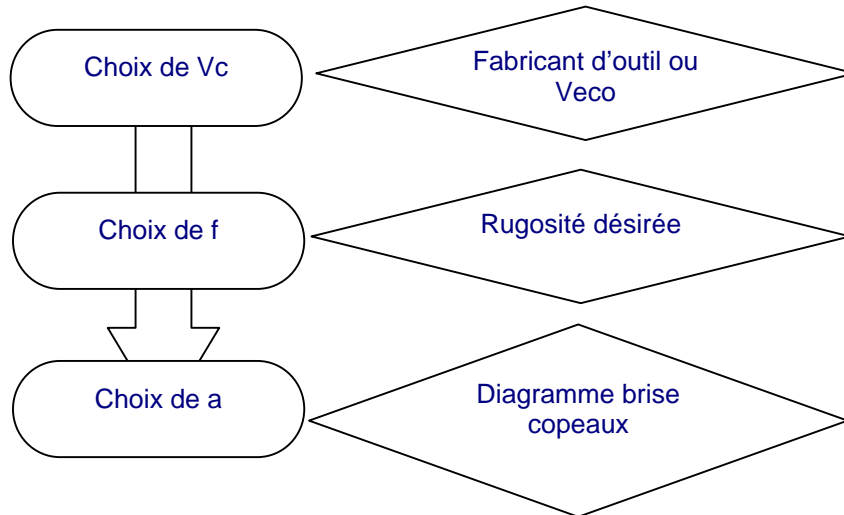
symbole	Désignation	Unité	Calcul
V_c	La vitesse de coupe	m/min	Imposé par le fabricant d'outil
N	la vitesse de broche	trs/min	$V_c = \frac{\pi D N}{1000}$
f	l'avance par tour	mm/trs	Fonction de la rugosité désirée, du copeaux mini
a	la profondeur de passe radiale	mm	1/3 de la largeur de la plaquette maxi. Fonction du diagramme brise copeaux
h_m	Epaisseur moyenne du copeaux	mm	
D	Diamètre usiné		
T	le temps de coupe	min	$T = \frac{l}{f N}$

Fraisage

symbole	Désignation	Unité	Calcul
V_c	La vitesse de coupe	m/min	Imposé par le fabricant d'outil
V_f	Vitesse d'avance pour le fraisage	mm/min	$V_f = f * n * N$
N	la vitesse de broche	trs/min	$V_c = \frac{\pi D N}{1000}$
f	l'avance par dent	mm/dents	Fonction de la rugosité désirée, du copeau mini
n	Nombre de dents sur la fraise		
a	la profondeur de passe radiale	mm	1/3 de la largeur de la plaquette maxi. Fonction du diagramme brise copeaux
h_m	Epaisseur moyenne du copeaux	mm	
D	Diamètre usiné		
t_c	le temps de coupe	min	$T = \frac{l}{f n N}$

.7.2. Choix des paramètres de coupe

Lorsque l'on fait un usinage unitaire, il n'est pas nécessaire d'optimiser les conditions de coupe. On se contente alors de choisir les conditions pour que l'usinage se passe bien. Lors que l'on fait une série de pièces, il devient intéressant d'essayer d'optimiser un des paramètres (voir chapitres suivants).



.7.3. Influence des conditions de coupe sur la rugosité

L'état de surface dépend de

- la combinaison : avance-rayon de bec.
- la stabilité de la machine, vibration, variation thermique
- la qualité de la coupe : présence de lubrifiant, d'une arête rapportée...

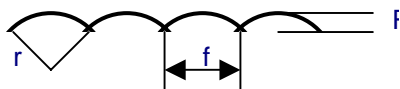
.7.3.1. Règles générales

On peut améliorer l'état de surface par des choix de vitesses de coupe plus élevées et par des angles de coupe positifs

En cas de risque de vibration, choisir un rayon de bec plus petit.

Les nuances revêtues donnent de meilleurs états de surface que les non revêtus.

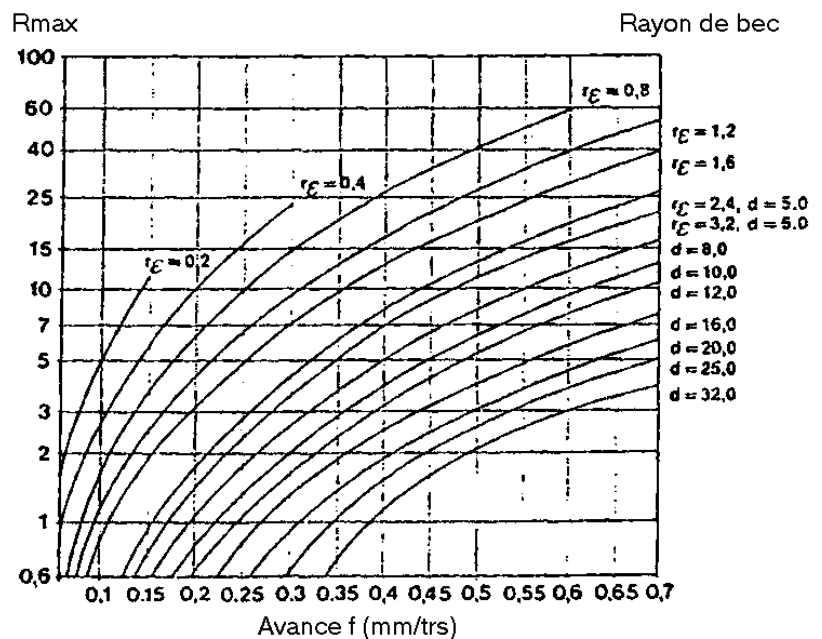
.7.3.2. Valeur théorique de la rugosité



On peut calculer la rugosité en tournage avec les formules :

$$R_{\max} = \frac{f^2}{8r} 1000 \quad \text{avec } R_{\max} \text{ en } \mu\text{m}$$

$$\text{et } R_a = \frac{f^2}{18 \cdot \sqrt{3} \cdot 8r}$$



7.4. Optimisation des conditions de coupe

L'optimisation des conditions de coupe peut se faire suivant différents critères :

- Coût
- Temps d'usinage
- Usure minimale
- Qualité maximale...

7.4.1. Optimisation pour avoir un coût minimum

7.4.1.1. Coût de l'usinage d'une pièce

Une première approche permet de calculer le coût d'une pièce faisant partie d'une série.

Notations :

- P_a = coût montage et réglage pour une pièce
- t_c = temps d'usinage pour une pièce
- P_m = coût machine plus opérateur par minutes
- P_o = coût d'une arête de coupe et de changement d'outil
- T = durée de vie de l'outil

$$C_p = P_a + t_c.P_m + P_o \frac{t_c}{T}$$

7.4.1.2. Calcul de P_o

Le coût d'une arête de coupe prend en compte le fait qu'il y a plusieurs arêtes par plaquettes.

- P_{pl} = prix d'achat d'une plaquette
- N_a = nombre d'arête par plaquette
- P_{po} = prix du porte outil
- N_p = nombre d'arête de coupe qui peuvent être monté sur le porte outil avant changement
- T_{vb} = temps de changement d'outil et de réglage.

$$P_o = \frac{P_{pl}}{N_a \cdot 7/8} + \frac{P_{po}}{N_p} + T_{vb}.P_m$$

$$\text{Temps de coupe : } t_c = \frac{l}{s.N} = \frac{l.\pi.D}{1000s.V_c} \quad \text{D'où } C_t = P_a + \frac{l.\pi.D}{1000s.V_c}.P_m + \frac{P_o}{C_v.s^x.a^y.V_c^n} \cdot \frac{l.\pi.D}{1000s.V_c}$$

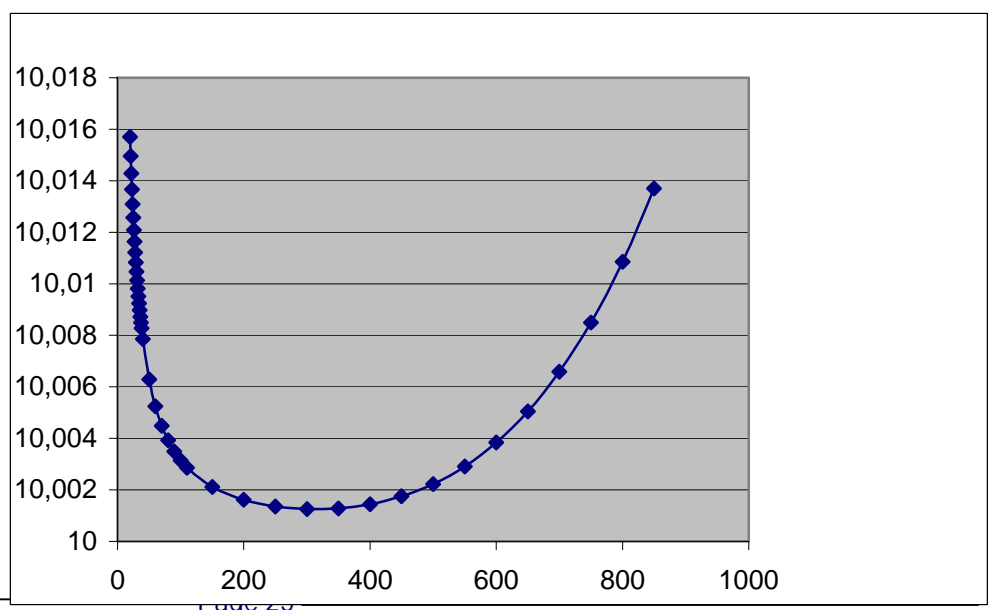
Ordre d'idée de prix :

$T_{vb} = 1\text{min}$ en ébauche et 3 min en finition

$P_{pl} = 4,5\text{€}$; $P_{po} = 35\text{€}$; $N_p = 400$; $P_m = 60\text{€/h}$

Courbe pour s constant $C_t = f(V)$:

plaquette carbure : $n = -4$, $y = 0$, $x = -2.4$, $C_v = 5.25 \cdot 10^{12}$



.7.4.1.3.Calcul du coût économique en faisant varier « V »

Le coût minimum est donné pour le point à tangente horizontale : $dCt/dV=0$

D'où :
$$V_{eco} = \sqrt[n]{\frac{-(n+1)Po}{CvPm.s^x.a^y}} \quad \text{et} \quad T_{eco} = -(n+1)\frac{Po}{Pm} : \text{équation 1}$$

.7.4.1.4.Calcul du coût économique en faisant varier « s »

Le coût mini peut être calculé en faisant varier « s » : il faut alors chercher : $dCt/ds=0$

D'où :
$$V_{eco(s)} = \sqrt[n]{\frac{-(x+1)Po}{CvPm.s^x.a^y}} \quad \text{et} \quad T_{eco} = -(x+1)\frac{Po}{Pm} : \text{équation 2}$$

Le point de moindre coût doit donc respecter V et s économique. Cela revient à annuler les deux dérivées : $\frac{dCt}{dV} = \frac{dCt}{ds} = 0 \Leftrightarrow x = n$. Or cette condition ne peut pas être respectée puisque x et n sont des constantes de l'outil avec $n \approx -5$ et $x \approx -1,4$.

.7.4.2. Optimisation pour avoir un temps de production minimum

$$Tt = Tr + Tu + \frac{Tvb}{T}.Tu \quad \text{avec}$$

Tt : temps de production par pièce

Tr : temps de montage/démontage par pièce

Tvb : temps de changement de plaquette

Tu : temps d'usinage

$$Tt = Tr + \frac{L\pi D}{1000sV} + \frac{Tvb \cdot L\pi D}{1000C_v s^{x+1} a^y V^{n+1}}$$

.7.4.2.1.Production maxi en faisant varier « V »

$$\frac{dTt}{dV} = 0 \quad \text{d'où} \quad V_{max i} = \sqrt[n]{\frac{-(n+1)Tvb}{C_v.s^x.a^y}} \quad \text{et} \quad T_{eco} = -(n+1)Tvb : \text{équation 3}$$

.7.4.2.2.Production maxi en faisant varier « s »

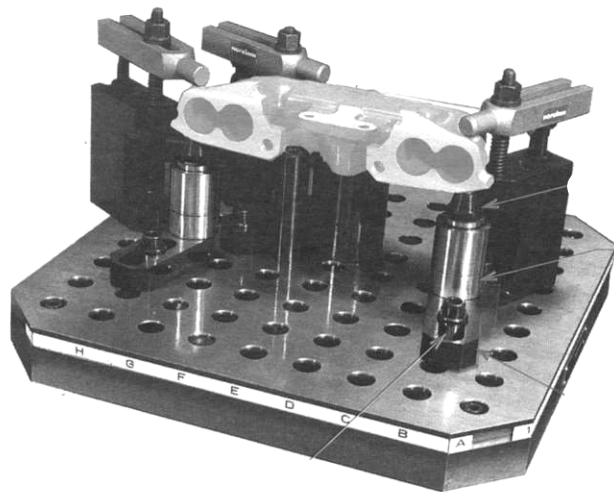
$$\frac{dTt}{ds} = 0 \quad \text{d'où} \quad V_{max i} = \sqrt[n]{\frac{-(x+1)Tvb}{C_v.s^x.a^y}} \quad \text{et} \quad T_{eco} = -(x+1)Tvb : \text{équation 4}$$

Récapitulatif $v = f(s)$, plaquette carbure : $n = -4$, $y = 0$, $x = -2.4$, $C_v = 5.25 \cdot 10^{12}$

Chapitre 2

Mise en position des pièces

Gamme d'usinage



Auteur

P. DEPEYRE

Sommaire

.1.	Etude de l'isostatisme	5
.1.1.	Mise en position de la pièce	5
.1.1.1.	Principe	5
.1.1.2.	Equivalences isostatiques	5
.1.1.3.	Règles pour choisir la mise en position	5
.1.2.	Maintien en position de la pièce	7
.1.2.1.	Les technologies de maintien en position	7
.1.3.	Symbolisation technologique	7
.1.3.1.	Exemple 1 : FRAISAGE	9
.1.3.2.	Exemple 2 : TOURNAGE	9
	Exemple 3 : TOURNAGE	9
	Exemple 3 : TOURNAGE	10
.1.4.	Modification de la pièce pour le montage d'usinage	10
.2.	Gamme d'usinage	11
.2.1.	Analyse d'un dessin de définition	11
.2.2.	Phase et sous-phase	11
.2.3.	Choix d'un outil	12
.2.4.	Exemple : tournage	12

.1.

Etude de l'isostatisme

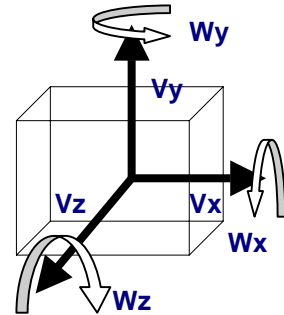
Le montage d'usinage doit remplir plusieurs rôles :

- **Positionner** toutes les pièces d'une série de la même façon,
- **Maintenir** la pièce pendant l'usinage (l'empêcher de se déplacer, de fléchir ou de vibrer).

.1.1. Mise en position de la pièce

Un solide dans l'espace peut se déplacer suivant 6 directions. L'objectif du montage est donc de bloquer (positionner) ces 6 mouvements : 3 rotations et 3 translations.

Représentation avec des normales de repérage (correspondant à des liaisons ponctuelles).



.1.1.1. Principe

Pour positionner totalement un solide,

- il faut 6 repérages élémentaires
- il faut que chaque repérage élimine un mouvement

Si le nombre de repérage est inférieur à 6, le repérage est partiel

Si le nombre de repérage est supérieur à 6, le repérage est hyperstatique

.1.1.2. Equivalences isostatiques

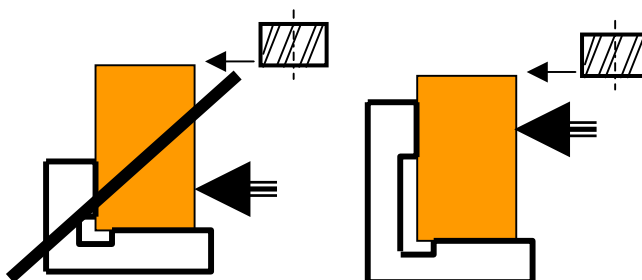
Liaison	<i>Ponctuelle</i>	<i>Plane</i>	<i>Linéaire rectiligne</i>	<i>Pivot glissant</i>	<i>Pivot</i>	<i>Rotule</i>
Type de surface	Point	Plan	Ligne	Cylindre	Cône	Sphère
Nbr de normales	1	3	2	4	5	3

.1.1.3. Règles pour choisir la mise en position

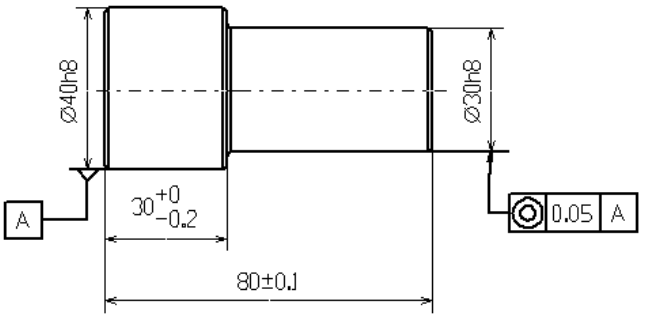
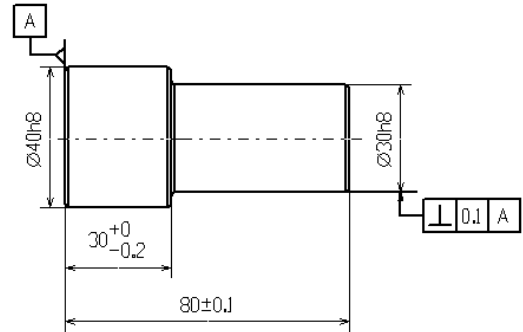
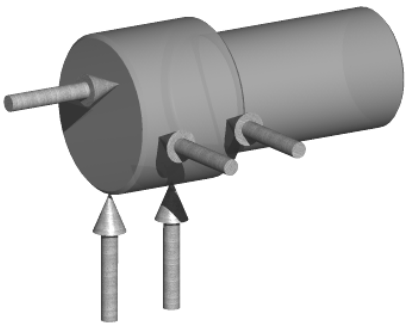
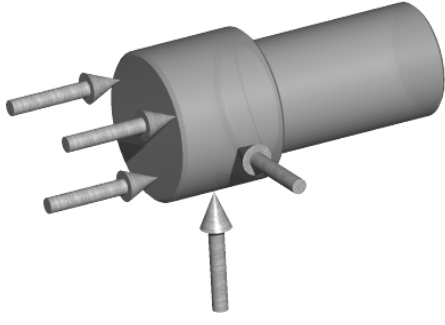
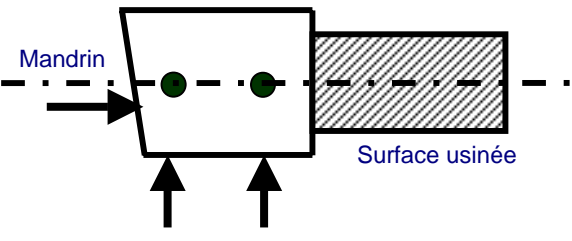
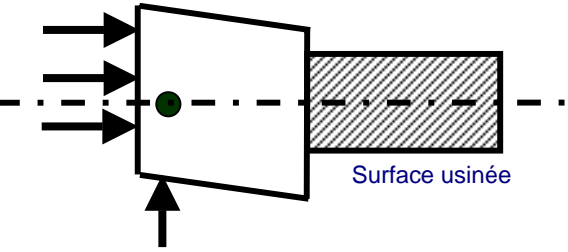
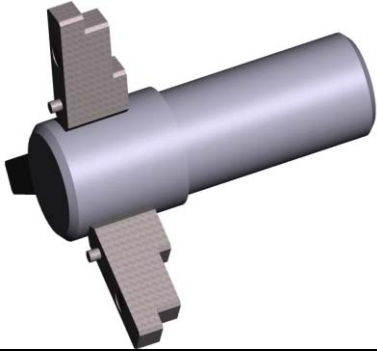
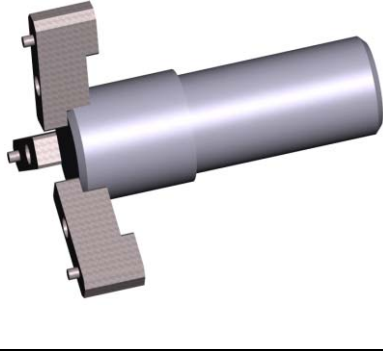
La mise en position doit faciliter la réalisation des cotes du dessin de définition. Elle doit donc

- S'appuyer au maximum sur des **surfaces usinées**.
- Faire coïncider la mise en position de la pièce avec la **cotation du dessin de définition** : cela évite les transferts de cote.
- Choisir des **surfaces suffisamment grandes** pour pouvoir positionner correctement la pièce
- Limiter les **déformations et vibrations** de la pièce : être proche de la zone usinée.

Exemple pour limiter les vibrations



Exemple de choix de prise de pièce en fonction de la cotation géométrique


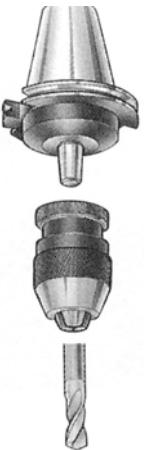
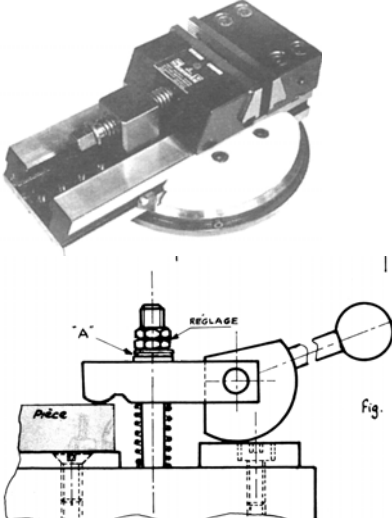
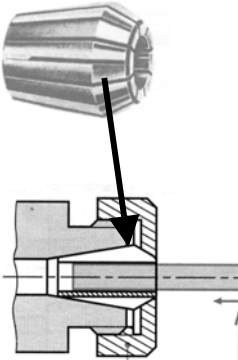
CENTRAGE LONG	CENTRAGE COURT
	
<p>Il faut réaliser une cocentricité entre les deux cylindres, on prend donc la pièce en mors doux : centrage long</p>	<p>Il faut réaliser une perpendicularité entre la face et le cylindre usiné, on choisira donc un appui plan sur la face et un centrage court.</p>
	
<p>La référence principale est donnée par le cylindre « A » qui définit l'axe de révolution.</p> <p>L'appui sur la face est la référence secondaire, pour définir la position de la pièce le long de l'axe.</p> <p>Mise en position de la pièce réelle avec ses défauts</p>	<p>La référence principale est donnée par le plan « A » qui définit la normale au plan.</p> <p>Le centrage court sur le cylindre défini la position de l'axe.</p>
	
<p>Solution technologique</p> 	

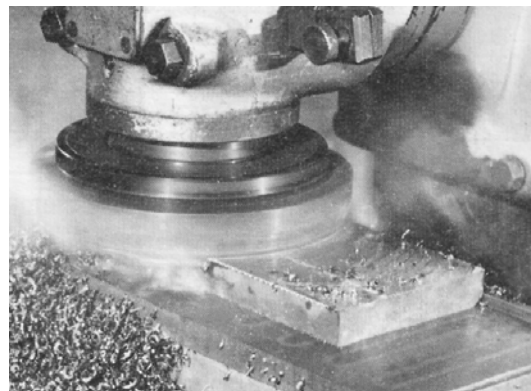
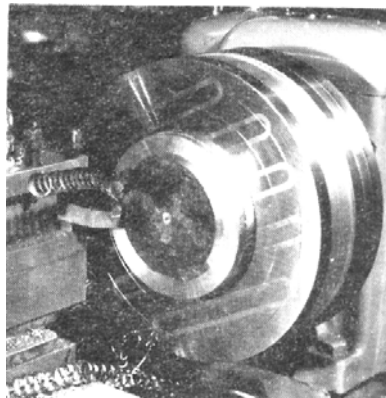
.1.2. Maintien en position de la pièce

Pour empêcher la pièce de bouger lors de l'usinage, il faut la maintenir en contact avec les zones de mise en position. Quelques règles à respecter pour les mettre en place.

- S'opposer aux forces de coupe.
- Ne pas déformer la pièce lors du serrage.
- Adapter le système en fonction de la série (utilisation de bridages polyvalents ou automatisés).

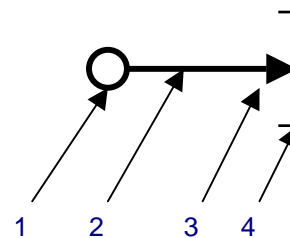
.1.2.1. Les technologies de maintien en position

Centrifuge	Adhérence	Magnétisme	Frottement et obstacle	Déformation
Mandrin à serrage concentrique	Surface conique	Plateaux magnétiques	Système mécanique, pneumatique ou hydraulique	Pincettes expansibles
		Voir les deux photos ci-dessous.		


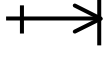


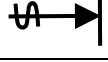
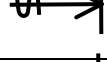



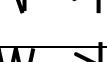
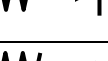
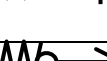
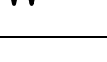
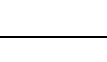


.1.3. Symbolisation technologique


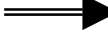
1	Type de technologie
2	Nature de la surface repérée
3	Fonction de l'élément technologique
4	Nature de la surface de contact





1 -Type de technologie

Appui fixe		Pièce d'appui, touche...		Touche de pré-localisation, détrompeur...
Centrage fixe		Centreur, broche...		Pré-centreur...
Système à serrage		Mise en position et serrage symétrique...		Bride, vérin...
Système à serrage concentrique		Mandrin pinces expansibles...		Entraîneur
Système de réglage irréversible		Appui réglage de mise en position...		Appui réglable de soutien
Système de réglage réversible		Vis d'appui réglable...		Antivibre
Centrage réversible		Pied conique...		Pied conique, broche conique










2 -Nature de la surface repérée

Surface usinée (1 trait)		Surface brute (2 traits)	
---------------------------------	--	---------------------------------	--

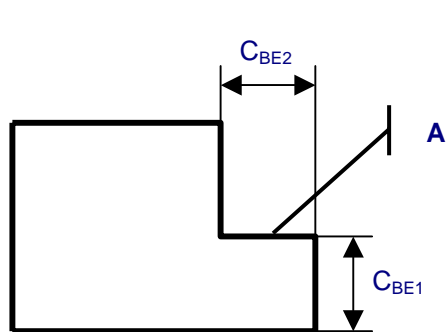
3 - Fonction de l'élément technologique

Mise en position		Maintien en position	
-------------------------	---	-----------------------------	---

4 - Nature de la surface de contact

Contact ponctuel	Contact surfacique	Contact strié	Pointe fixe	Pointe tournante
				
Contact dégagé	Cuvette	Vé	Palonnier	
				

.1.3.1. Exemple 1 : FRAISAGE



C_{BE} sont les cotes définies par le bureau d'étude
 C_f sont les cotes fabriquées

La prise de pièce propose

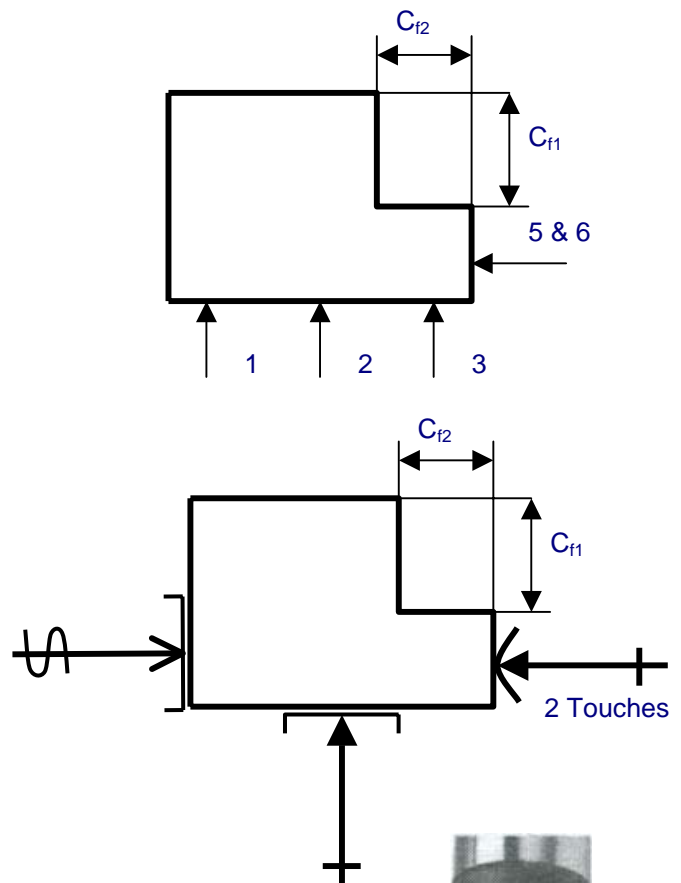
- une mise en position prépondérante sur la face inférieure : appui plan
- une mise en position secondaire sur le coté : linéaire rectiligne

Remarque 1 :

Il n'y a que 5 appuis. En effet la position suivant la dernière direction n'a pas d'importance, le dernier mouvement est bloqué par adhérence.

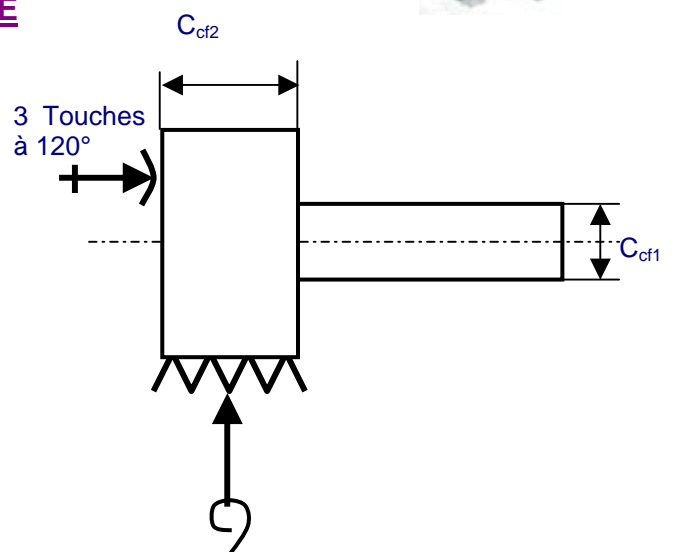
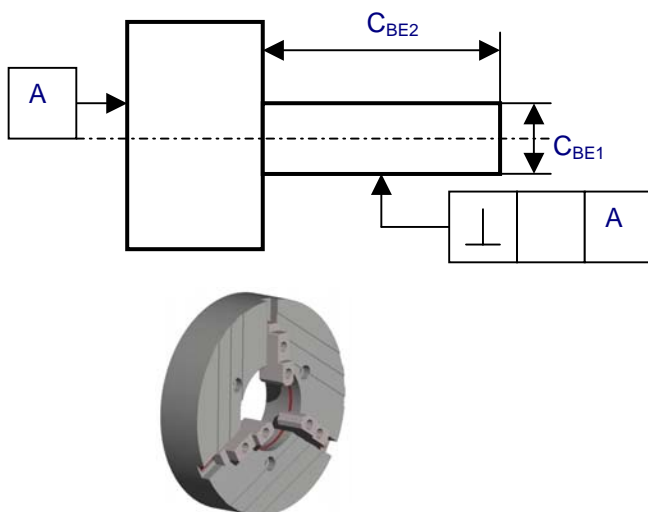
Remarque 2 :

La surface A est réalisée avec une fraise 2 tailles en tangentant sur la face supérieure de la pièce. La cote réalisée est donc C_{f1} .
 Ce n'est pas la même cote que celle définie par le bureau d'étude, il faudra donc faire un « transfert de cote » (cf § suivant).



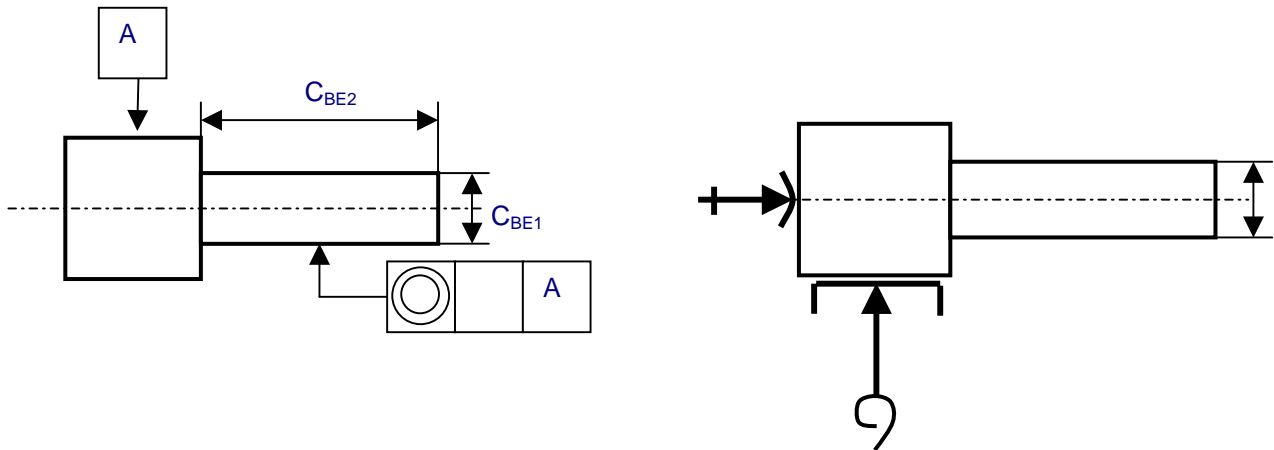
.1.3.2. Exemple 2 : TOURNAGE

Centrage court avec appui plan.



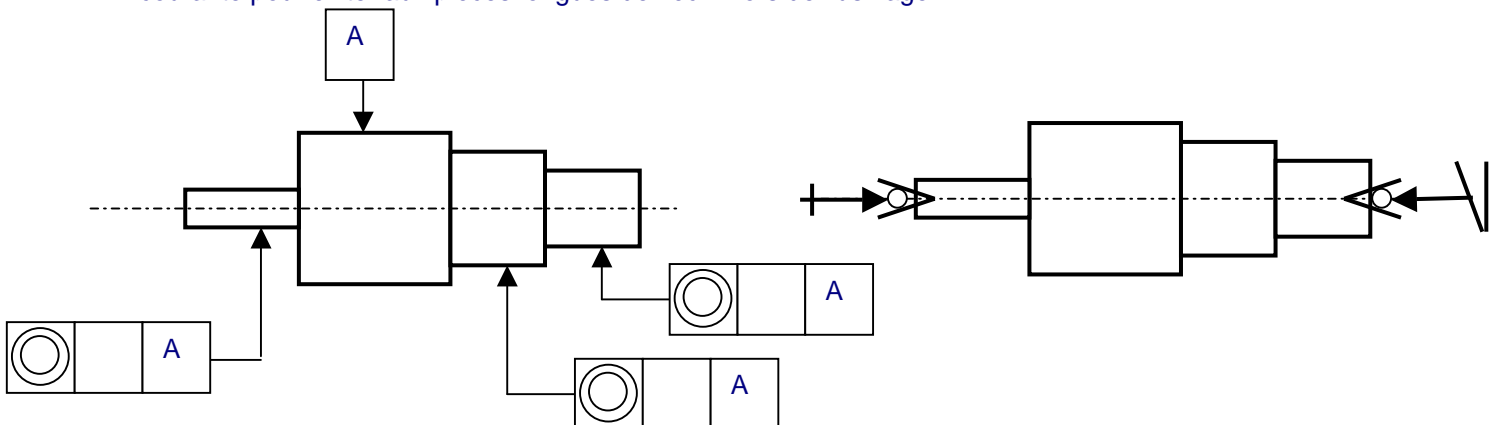
Exemple 3 : TOURNAGE

Centrage long avec appui ponctuel

**.1.4. Modification de la pièce pour le montage d'usinage**

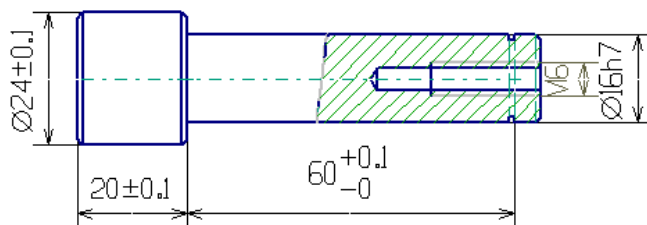
Il est courant de modifier la pièce en vue de faciliter son montage sur la machine.

Trou de centrage pour positionner une contre pointe tournante. Cette modification mineure est très courante pour éviter aux pièces longues de fléchir lors de l'usinage.

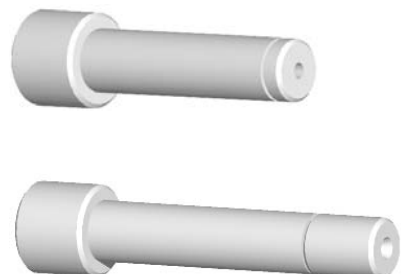


Surlongueur ou surépaisseur : il s'agit de rajouter de la matière pour permettre la prise de pièce. La surépaisseur est enlevée lors des derniers usinages.

Exemple 1 : Pour usiner le diamètre 16h7, il faut tenir la pièce avec une contre pointe. Mais le taraudage M6 serait endommagé. On la rallonge, elle est ensuite coupée par tronçonnage.



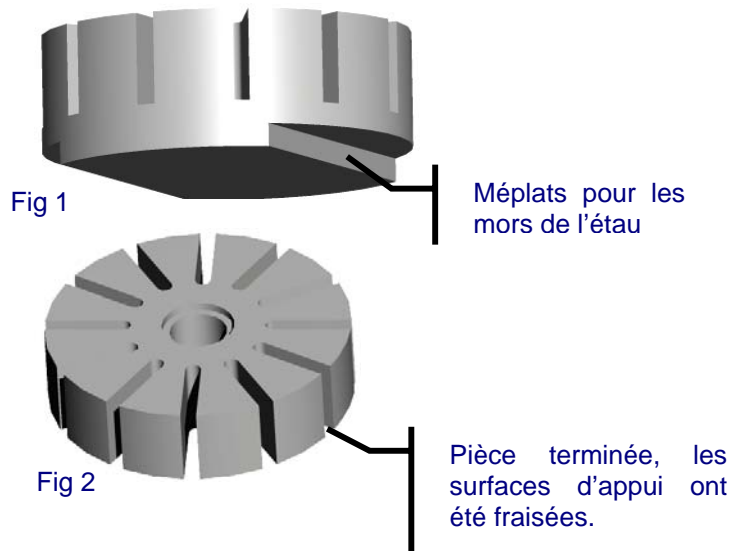
Pièce modifiée, avec le centrage pour la contre pointe.



Exemple 2 :

Pour usiner les rainures en étoile d'un rotor de pompe à palettes, on utilise une fraise deux tailles de diamètre 6, en usinant, en bout, sur une commande numérique.

Pour tenir la pièce simplement en étau, il faut rallonger le brut et faire deux méplats (fig1). La zone non fonctionnelle sera enlevée par surfacage.

**.2. Gamme d'usinage**

L'objectif de la gamme est de définir l'ordre des opérations d'usinage et les différentes prises de pièces associées.

Les contraintes sont nombreuses :

- Utilisation du parc machine présent
- Utilisation des outils présents
- Respect des spécifications du dessin de définition
- Coût minimum
- ...

.2.1. Analyse d'un dessin de définition

Etudier dans l'ordre :

- Le nombre de pièces à réaliser
- La matière
- Les formes globales de la pièce
- Tracer en rouge les surfaces usinées
- Analyser les spécifications suivant les trois axes : valeurs des IT, spécifications géométriques, surfaces fonctionnelles.
- Choisir la prise de pièce pour chaque phase

.2.2. Phase et sous-phase




Chaque **phase** correspond à un poste d'usinage donné

Une fraiseuse, un tour ...

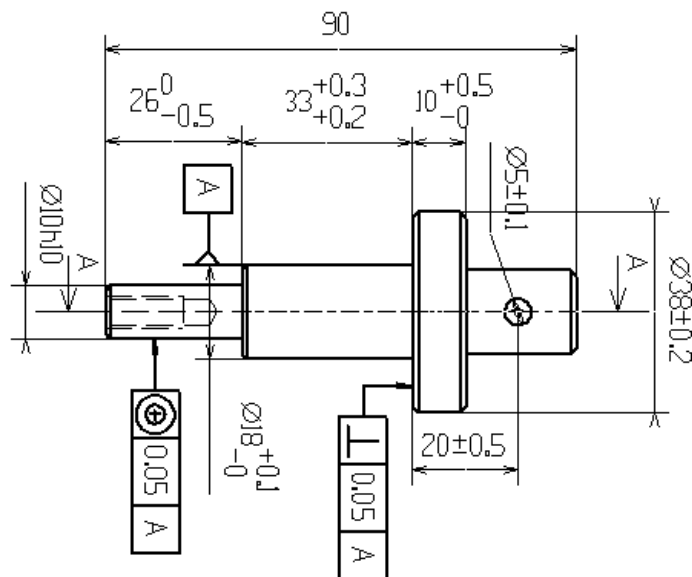
♦ Les **sous phases** correspondent à une série d'usinage sans démonter la pièce

- Les **opérations** correspondent aux différents usinages
Chaque changement d'outil.

.2.3. Choix d'un outil

Mode de réalisation	Rugosité - Ra	Qualité			
Moulage au sable	10 - 25				
Moulage cire perdue	0.8 - 3.2				
Moulage sous pression	0.8 – 6.3				
Matricage	1.6 – 20				
filage	1.6 – 20				
Fraisage ARS	1.6 – 6.3	> 7	0.05	0.03	0.005
Fraisage carbure	0.4 – 1.6	> 6	0.01	0.02	0.02
Tournage	0.8 – 3.2	> 6	0.01	0.02	0.005
Perçage	1.6 – 6.3	9 – 12	0.2	0.1	0.1
Outil à aléser	0.8 – 3.2	5 – 8	0.005	0.01	0.01
Alésoir	0.4 – 3.2	5 – 8			
Brochage	0.4 – 3.2		0.002		0.002
rectification	0.2 – 1.6	5 – 7	0.001	0.001	0.002
Superfinition	0.025 – 0.1	4 - 5	0.0005	0.001	0.002

.2.4. Exemple : tournage



Analyse du dessin

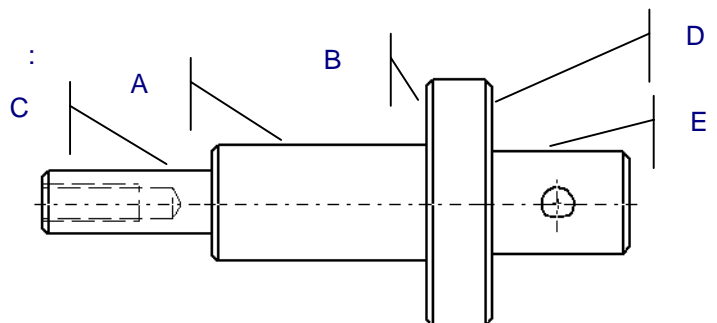
La surface A est surface de référence pour B et C.

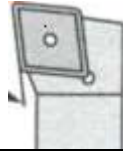
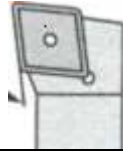
Il faut donc

- Usiner ces surfaces dans la même sous-phase.
- Ou se reprendre sur A pour usiner B et C.

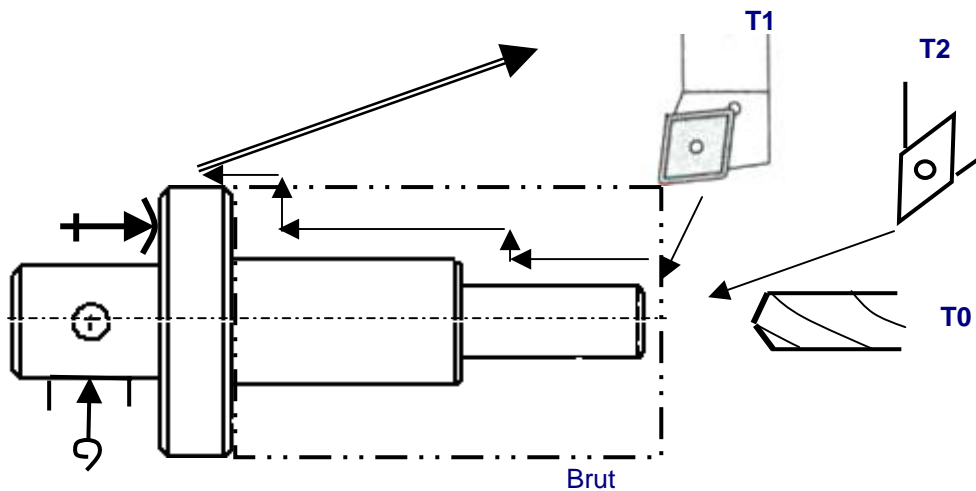
Dans notre cas; il sera facile d'usiner A, B et C sans démontage de pièce.

Il n'y a pas de tolérances particulièrement serrées.



Phase 000	Sciage du brut : Diamètre 40 - Longueur : 94		
Phase 100	<i>Sous-phase 110 Tournage</i> Mandrin en mors durs	Ebauche et finition de E et D	Outil à charioter dresser 
	<i>Sous phase 120 Tournage</i> Mandrin mors doux sur E appuie sur D	Perçage Ebauche et finition de C, A et B	Outil à charioter dresser 
Phase 200	<i>Taraudage Manuel</i>		Taraud
Phase 300	<i>Sous phase 200 Fraisage</i> Prise en mandrin mors doux sur A et en butée sur B	Perçage du diamètre 5	Foret

Phase :		120	Contrat de phase						Nom :		
Ensemble :		Pompe							Date :		
Pièce :		Arbre	Machine			Tour manuel			N° pgr :		
Matière		C32E	Porte pièce			Mors doux			Atelier :		
Nombre		50	Brut			SP 110					
opération			Condition de coupe						Porte pièce		
N°	Rep	Désignation	Vc	f	N	a	n _p	Lub	Outil	Contrôle	
121	T0	Perçage	25	0.1	1500			Oui	Foret Φ 5		
	T1	Ebauche Φ10	315	0.4	3500	3		Oui	CNMM 12 04 08	Pac	
		Ebauche Φ18	315	0.4	3500	2		Oui	CNMM 12 04 08	Pac	
	T2	Ebauche Φ36	315	0.4	2600	1		Oui	CNMM 12 04 08	Pac	
		Finition Φ10	440	0.1	3500	0.2		Oui	DCMW 11 04 08	Pac	
		Finition Φ18	440	0.1	3500	0.2		Oui	DCMW 11 04 08	Microm.	
		Finition Φ36	440	0.1	3050	0.2		Oui	DCMW 11 04 08	Microm.	



Remarque

Sur cette simulation, il manque les cotes de fabrication qui seront définies au chapitre suivant.

Chapitre 3

COTATION

P. DEPEYRE

Remerciements

Ce polycopié fait largement référence aux ouvrages de S. RAYNAUD (INSA de Lyon), P. BALLUET (ENISE) et de D. CHAISE (INSA de Lyon).

Bibliographie

- « Montage d'usinage » R. Pazot ed. Desforges
- « Memo Formulaire – Fabrication Mécanique » – ed. Educavivre
- « Guide pratique de la productique » – Chevalier - ed. Hachette
- « Méthode avant projet – isostatisme » – Rigal & Mabrouki – INSA de Lyon
- « Liaisons et mécanismes : modélisation et tolérancement » - Luc CHEVALIER

Sommaire

.1. Introduction	4
.2. Mise en place de la cotation sur le dessin de définition	4
.3. Tolérances	5
.3.1. Origine du tolérancement	5
.3.2. Inscription des tolérances	5
.4. Principes de tolérancement.	5
.4.1. Principe de l'indépendance. [Norme NF E-04 561/ ISO8015].	5
.4.2. Exigence de l'enveloppe E	6
.4.3. Exigence du maximum de matière M	6
.5. Tolérances géométriques.	7
.5.1. Élément de référence.	7
.5.2. Types de référence.	7
.6. Les Ajustements	9
.6.1. Définition	9
.6.2. Le système d'ajustement I.S.O.	9
.6.3. Position.	9
.6.4. Dimensions nominales	10
.6.5. Représentation des écarts	11
.6.6. Qualité	12
.6.7. Les ajustements recommandés.	13
.6.8. Inscription sur le dessin.	14
.6.9. Valeurs standards	14
. Chaînes de cotes	15
.1. Condition fonctionnelle	15
.2. Cotes fonctionnelles	16
.3. Méthode des chaînes de cotes	16
.3.1. Exemple 1 : liaison glissière.	16
.3.2. Exemple 2 : liaison pivot.	18
.4. Critères de choix des conditions fonctionnelles	20
. Etats de surface	21
.1. Décomposition en 4 ordres	21
.2. Origine des défauts.	22
.3. Mesure	22
.4. Critère d'états de surface	23
.5. Spécification et choix des états de surface au BE.	24
.6. Choix et évaluation des critères.	25
. Cotation de fabrication	27
.1. Les différentes cotes de fabrication	27
.1.1. Cote machine Cm	27
.1.2. Cote outil : Co	27
.1.3. Cote appareil : Ca	28
.2. Les causes de dispersion	28
.3. Transfert de cote	28
. Contrat de phase	30

Cotation des dessins

.1. Introduction

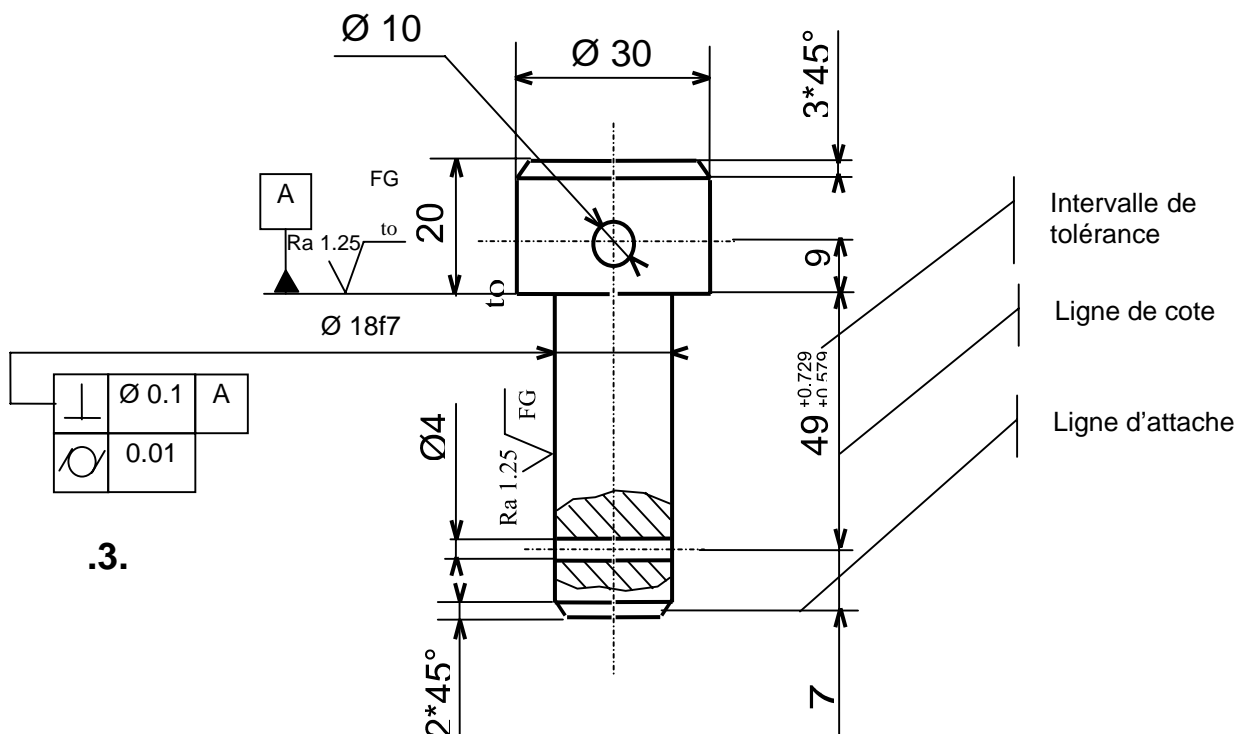
Lorsque l'on conçoit un système, on est amené à le dimensionner pour respecter les conditions de fonctionnement. Il faut donc indiquer les dimensions des pièces afin de les fabriquer.

Le but de la cotation est de fournir les dimensions et formes à respecter en fonction de conditions fonctionnelles.

.2. Mise en place de la cotation sur le dessin de définition

☞ On indique toujours les *cotes réelles de la pièce dessinée* (sans tenir compte de l'échelle de tracé).

☞ Ne pas couper une ligne de cote par une ligne d'attache.



.3.

Tolérances

3.1. Origine du tolérancement

Il n'est pas possible en fabrication d'obtenir une dimension demandée par un constructeur avec une absolue précision. Tout au plus peut-on donner deux bornes entre lesquelles se situera la dimension fabriquée.

3.2. Inscription des tolérances

On inscrira, à la suite de la valeur nominale, la plage de variation autorisée pour cette dimension, par exemple :

$$98 \pm 0,2$$

signifie que la dimension fabriquée devra se situer entre 97,8 et 98,2 mm

On dit que l'**intervalle de tolérance (IT)** de cette dimension est de 0,4 mm



La valeur nominale ne correspond pas forcément (pas souvent) au milieu de l'intervalle de tolérance.

Tolérancement symétrique :

$$35 \pm 0,5$$

Tolérancement asymétrique :

$$43^{+0,3}_{-0,2}$$

$$55^{0}_{-0,4}$$

$$18^{+0,3}_{0}$$

Tolérancement unilatéral :

$$15_{\text{min}}$$

4. Principes de tolérancement.

Suite à l'évolution des normes de cotation et de tolérancement des pièces mécaniques ces dernières années, on utilise et on rencontre de plus en plus sur les plans de définition une cotation faisant appel:

- au principe de l'indépendance,
- aux exigences de l'enveloppe et du maximum de matière,
- aux localisations et aux références.

4.1. Principe de l'indépendance. [Norme NF E-04 561/ ISO8015].

« Chaque exigence dimensionnelle ou géométrique spécifiée sur un dessin doit être respectée en elle-même (indépendamment) sauf indication particulière ».

Il y a indépendance entre les dimensions et la géométrie des éléments.

Il faut décomposer et mesurer séparément les différents types de défauts en métrologie (voir **FIG26**).

C'est le principe utilisé par défaut .

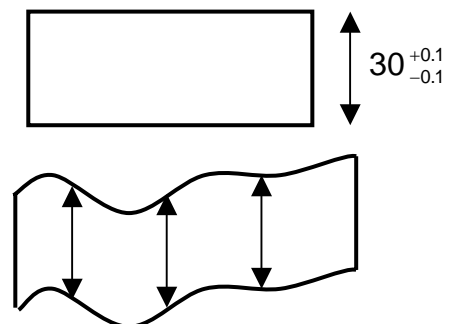
Exemple

La spécification $30^{+0,1}_{-0,1}$ portée entre deux plans parallèles (ou sur un cylindre) signifie que toutes les dimensions locales des surfaces réelles doivent avoir les valeurs « di » comprises dans l'intervalle

[29.9 ; 30.1].

Remarque

Le principe de l'indépendance est parfaitement adapté aux grandes pièces..

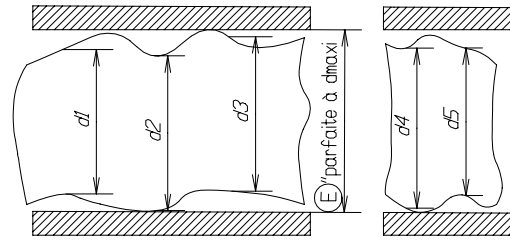


4.2. Exigence de l'enveloppe (E)

Elle se traduit par la mise en place d'une relation entre la *dimension* et la *forme* d'un élément. Elle dit que l'enveloppe de *forme parfaite au maximum de matière* ne doit pas être dépassée.

Exemple

Les deux surfaces du parallélépipède ne doivent pas dépasser l'enveloppe de forme parfaite correspondant à deux plans parallèles et distants de 30.1 et aucune dimension locale réelle doit être inférieure à 29.9.



Remarque

Le principe de l'enveloppe est bien adapté aux pièces destinées à être assemblées.

Par contre : il n'est pas adapté lorsque les pièces sont longues.

Il ajoute une restriction géométrique, ce qui peut aller à l'encontre des impératifs économiques. Il ne faut donc pas généraliser le principe de l'enveloppe à toute la pièce mais uniquement aux surfaces le nécessitant.

4.3. Exigence du maximum de matière (M)

Elle se traduit par la mise en place d'une relation entre la *dimension* et la *position ou l'orientation* d'un élément. Elle permet d'augmenter la tolérance géométrique d'un élément ou d'un groupe d'éléments en fonction de la dimension des éléments concernés par la tolérance géométrique.

Exemple

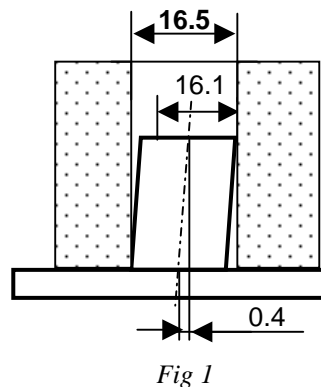
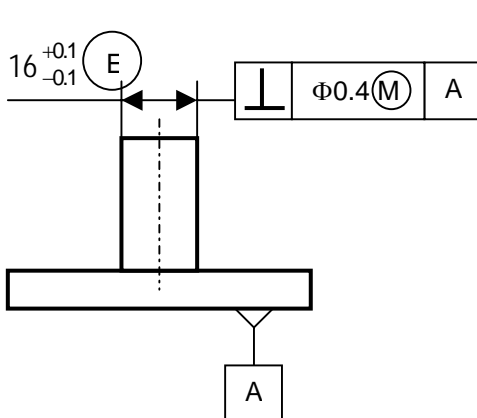


Fig 1

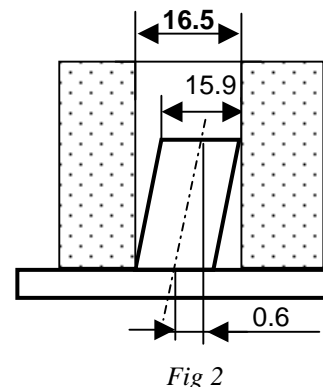


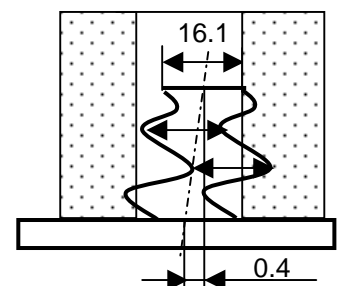
Fig 2

La cote de 16.5 correspondant à l'association entre la cote linéaire et la perpendicularité est fixée, ce qui permet d'augmenter la tolérance de la condition géométrique (perpendicularité de 0.4 à 0.6) en fonction de la dimension linéaire de la pièce.

Remarque

Il est à noter que le principe de l'enveloppe doit être appliqué à la cote linéaire $16^{+0.1}_{-0.1}$. Pour éviter des formes comme ci-contre, car la perpendicularité est mesurée sur l'axe moyen du cylindre, et permet donc des écarts de forme importants.

La cotation au maximum de matière est parfaitement adaptée aux pièces devant s'assembler.

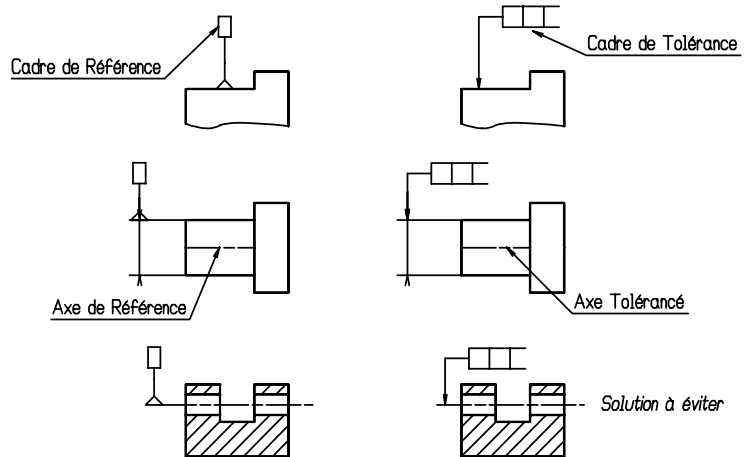


.5. Tolérances géométriques.

Les tolérances géométriques limitent l'écart de l'élément réel par rapport à sa forme, son orientation, sa position théoriquement exacte sans tenir compte de la dimension de l'élément [ISO8015]

.5.1. Élément de référence.

Il est désigné par une flèche inversée. Les éléments de référence peuvent être des lignes ou des surfaces réelles. Ils servent à la construction de références simples, communes ou de systèmes de référence.



.5.2. Types de référence.

Les différents types de références les plus utilisés sont résumés dans le tableau suivant :

	<p>Référence simple</p> <p>Elle est construite à partir d'un élément géométrique : point, droite ou plan que l'on associe au mieux à la surface réelle de référence (A)</p>	
	<p>Référence commune</p>	
	<p>Système de référence ordonné</p>	

Symboles et caractéristiques à tolérer.			Exemples d'application.		
			Indication sur le dessin.	Zone de tolérance.	Interprétation.
TOLÉRANCES DE FORME		Rectitude d'une ligne ou d'un axe			L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de la tolérance doit être compris dans une zone cylindrique de diamètre 0,03.
		Planéité d'une surface			La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05.
		Circularité d'un disque, d'un cylindre, d'un cône, etc...			Le pourtour de chaque section droite doit être compris dans une couronne circulaire de largeur 0,02.
		Cylindricité			La surface considérée doit être comprise entre deux cylindres coaxiaux dont les rayons différents de 0,05.
		Forme d'une ligne quelconque			Dans chaque section parallèle au plan de la projection, le profil considéré doit être compris entre deux lignes enveloppées des cercles de diamètre 0,04 dont les centres sont situés sur une ligne ayant le profil géométrique correct.
		Forme d'une surface quelconque			La surface considérée doit être comprise entre 2 surfaces enveloppées des sphères de diamètre 0,03 dont les centres sont situés sur une surface ayant la forme géométrique.
TOLÉRANCES DE POSITION		Parallélisme d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite de référence ou un plan de référence			L'axe supérieur doit être compris dans une zone cylindrique de diamètre 0,1 parallèle à l'axe inférieur A (droite de référence).
		Perpendicularité d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite ou un plan de référence.			L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de tolérance doit être compris entre deux droites parallèles distantes de 0,05 perpendiculaires au plan de référence et se trouvant dans le plan indiqué sur le dessin.
		Inclinaison d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite ou un plan de référence.			L'axe du trou doit être compris entre deux droites parallèles distantes de t = 0,1 et formant avec le plan de référence un angle de 60°.
		Localisation de lignes, axes ou surface entre eux ou par rapport à un ou plusieurs éléments.			L'axe du trou doit être compris dans une zone cylindrique d'un diamètre de 0,05 dont l'axe est dans la position théorique spécifiée de la ligne.
		Coaxialité (concentricité) d'un axe ou d'un point par rapport à un axe ou un point de référence			L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de tolérance doit être compris dans une zone cylindrique de diamètre 0,03 coaxiale à l'axe de référence A.
		Symétrie d'un plan médian ou d'une ligne médiane (axe) par rapport à une droite ou un plan de référence.			Le plan médian de la rainure doit être compris entre deux plans parallèles distants de 0,06 et disposés symétriquement par rapport au plan médian de l'élément de référence A.
BATEMENT		Battement simple d'un élément sur l'axe de révolution.			Le battement simple radial ne doit pas dépasser 0,02 dans chaque plan de mesure pendant une révolution complète autour de l'axe de référence commune A - B.
		Battement total d'un élément sur l'axe de révolution.			Le battement total radial ne doit pas dépasser 0,1 entre chaque point de la surface spécifiée durant plusieurs révolutions autour de l'axe de référence A - B et avec un mouvement axial relatif entre la pièce et l'instrument de mesure. Le mouvement doit être guidé le long d'une ligne de contour de forme théoriquement parfaite étant en position correct de l'axe de référence.

.6. Les Ajustements

.6.1. Définition

Un ajustement est un système de cotation normalisé concernant un assemblage de deux pièces.

.6.2. Le système d'ajustement I.S.O.

Système international normalisé, il permet au concepteur d'indiquer d'une façon rapide et pratique le type d'assemblage souhaité.

En ce qui concerne la maintenance, l'interchangeabilité des pièces est largement améliorée.

Du point de vue de la fabrication, les coûts sont abaissés par la diminution du nombre d'outillage et de moyens de contrôle.

Le système I.S.O. utilise plusieurs paramètres :

- La dimension nominale
- La position : c'est à dire la situation de l'intervalle de tolérance de l'arbre ou de l'alésage par rapport à la ligne zéro de la dimension nominale. Elle est repérée par une lettre.
- La qualité : c'est à dire la dimension de l'intervalle de tolérance. Elle est repérée par un nombre.

.6.3. Position.

☞ On repère par une **LETTRE MAJUSCULE**, la position de **l'alésage** par rapport à la dimension nominale.

☞ On repère par une **lettre minuscule**, la position de **l'arbre** par rapport à la dimension nominale

.6.4. Dimensions nominales

Les dimensions nominales des pièces sont à choisir principalement dans des **séries de dimensions standards**, de façon à réduire les outils, outillages et moyens de mesure ainsi que les coûts de fabrication.

Ces séries sont appelées **séries Renard**. On utilisera dans l'ordre de préférence les séries R10, R20, R40 ou en cas de besoin les valeurs entières des séries Ra10, Ra20, Ra40.

On remarquera que les valeurs des diamètres des roulements, par exemple, sont bien issues de telles séries (Ra10), de même que les diamètres nominaux des tuyauteries.

La norme NF E 01-001 précise l'obtention de ces valeurs : série géométrique partant de 10^1 et de raison $10^{(1/10)}$ pour les R10 et Ra10, $10^{(1/20)}$ pour les R20 et Ra20 ...

Séries Renard de 10 à 100 mm					
R10	R20	R40	Ra10	Ra20	Ra40
10	10	10	10	10	10
	11,2	11,2		11	
12,5	12,5	12,5	12	12	12
		13,2			13
	14	14		14	14
		15			15
16	16	16	16	16	16
		17			17
	18	18		18	18
		19			19
20	20	20	20	20	20
		21,2			21
	22,4	22,4		22	22
		23,6			24
25	25	25	25	25	25
		26,5			26
	28	28		28	28
		30			30
31,5	31,5	31,5	32	32	32
		33,5			34
	35,5	35,5		36	36
		37,5			38
40	40	40	40	40	40
		42,5			42
	45	45		45	45
		47,5			48
50	50	50	50	50	50
		53			53
	56	56			56
		60			60
63	63	63	63	63	63
		67			67
	71	71		71	71
		75			75
80	80	80	80	80	80
		85			85
	90	90		90	90
		95			95
100	100	100	100	100	100

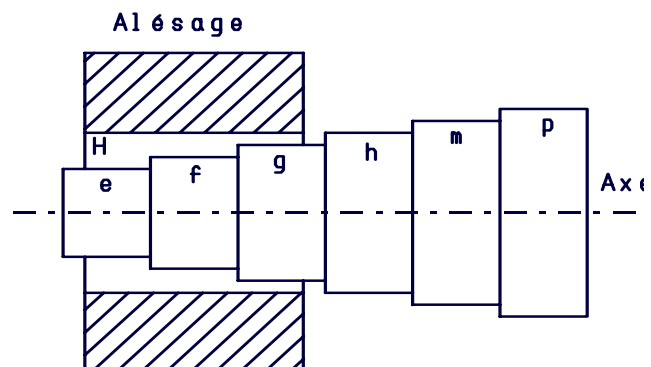
.6.4.1. Système à alésage normal.

On utilise très fréquemment le système à alésage normal, dans lequel l'alésage reste constant et égal à H.

☞ Pour obtenir un *ajustement libre* (avec jeu positif important), on choisira un arbre **e** ou **f**.

☞ Pour obtenir un *ajustement glissant* (avec jeu positif faible), on choisira un arbre **g** ou **h**.

☞ Pour obtenir un *ajustement serré* (avec jeu négatif), on choisira un arbre **m**, **p** ou **s**.

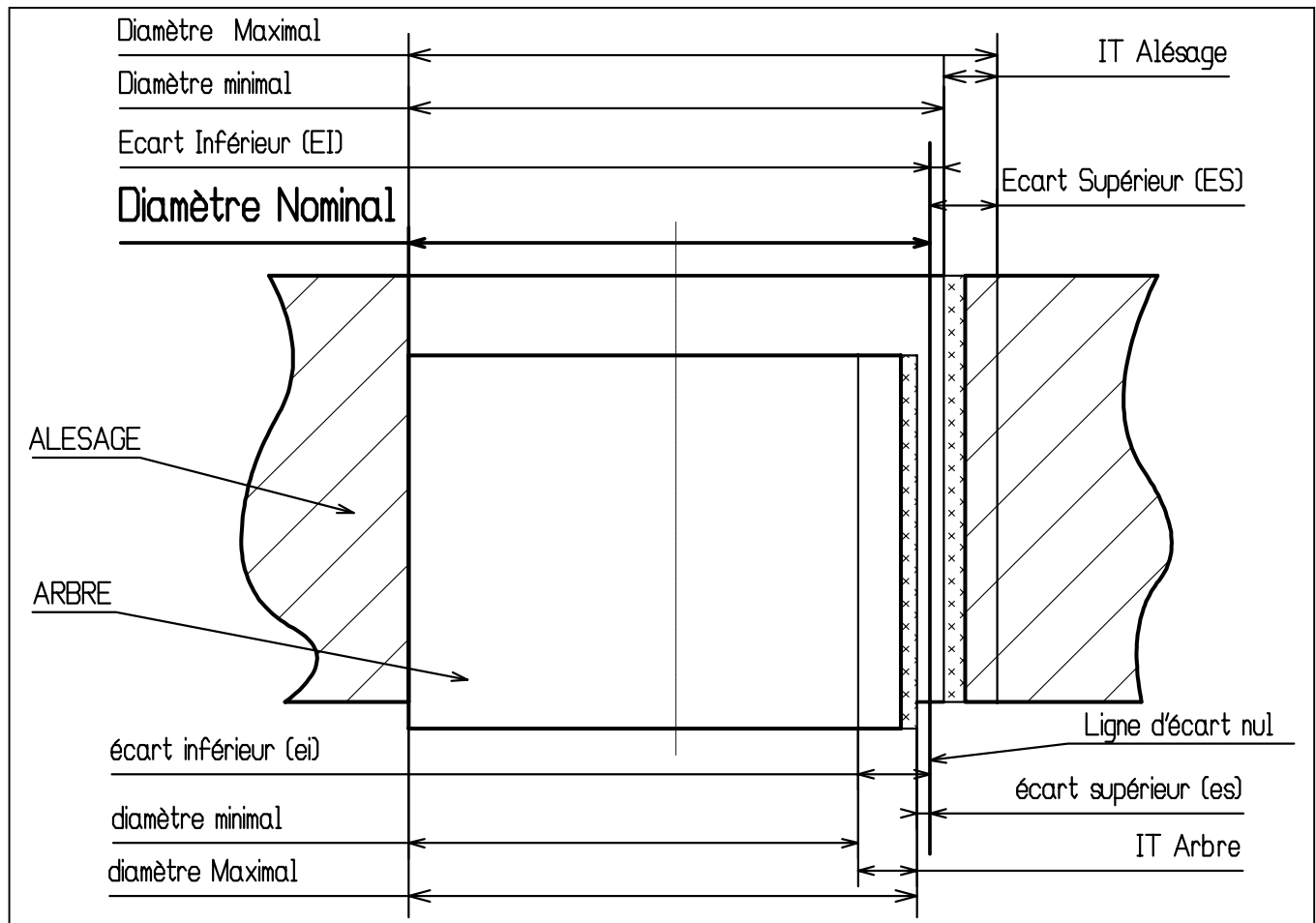


.6.4.2. Système à arbre normal

Dans le système à arbre normal, beaucoup plus rare, c'est l'alésage qu'on fait varier, tandis que l'arbre reste sur la dimension nominale.

☞ Le dessin ci-dessous montre la position de l'arbre et de l'alésage par rapport à la valeur nominale.

.6.5. Représentation des écarts



ALESAGE	Ecart supérieur $ES = D_{\text{maxi}} - D_{\text{nom}}$ Ecart inférieur $EI = D_{\text{mini}} - D_{\text{nom}}$
ARBRE	Ecart supérieur $es = d_{\text{maxi}} - d_{\text{nom}}$ Ecart inférieur $ei = d_{\text{mini}} - d_{\text{nom}}$

.6.6. Qualité

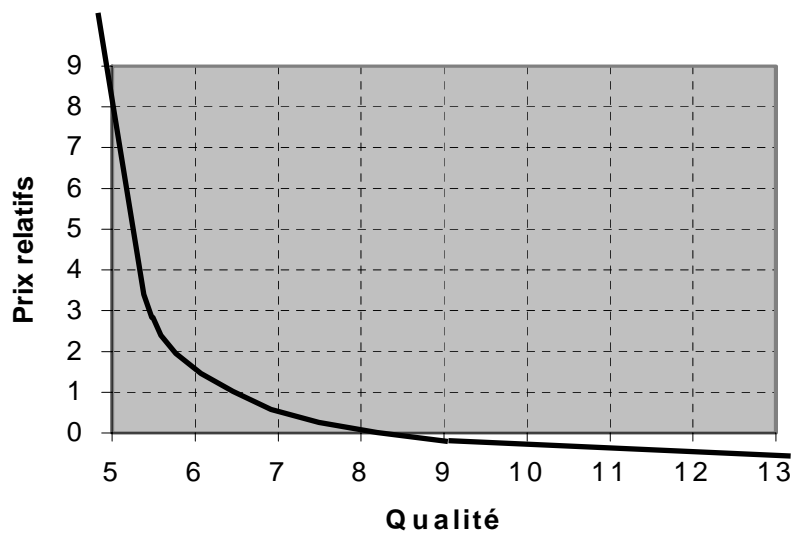
Elle s'exprime par un nombre qui va de 1 à 16 pour les valeurs les plus courantes.

La qualité est d'autant meilleure que le nombre qui la représente est petit.

En mécanique générale, 6 et 7 représentent des qualités très soignées, 8 et 9 des qualités moyennes, 11 une qualité ordinaire et 13 une qualité très ordinaire.

Qualité	DIMENSIONS (en mm)									
de	0	3	6	10	18	30	50	80	120	180
à (inclus)	3	6	10	18	30	50	80	120	180	250
qualité	TOLERANCES FONDAMENTALES IT (en μm)									
5	4	5	6	8	9	11	13	15	18	20
6	6	8	9	11	13	16	19	22	25	29
7	10	12	15	18	21	25	30	35	40	46
8	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72
9	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115
10	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185
11	60	75	90	110	130	160	190	220	250	290
12	100	120	150	180	210	250	300	350	400	460
13	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720
14	250	300	360	430	520	620	740	870	1000	1150
15	400	480	580	700	840	1000	1200	1400	1600	1850
16	600	750	900	1100	1300	1600	1900	2200	2500	2900

Prix approximatif d'un usinage en fonction de la qualité



.6.7.

Les ajustements recommandés.

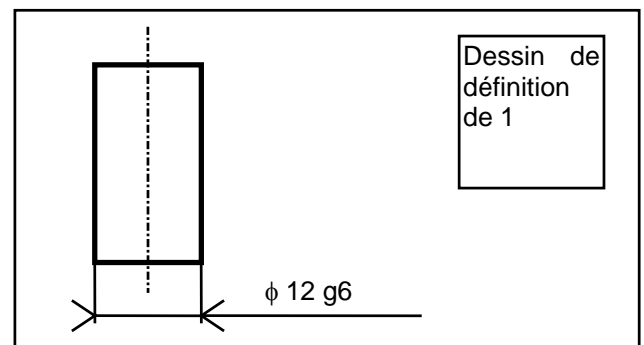
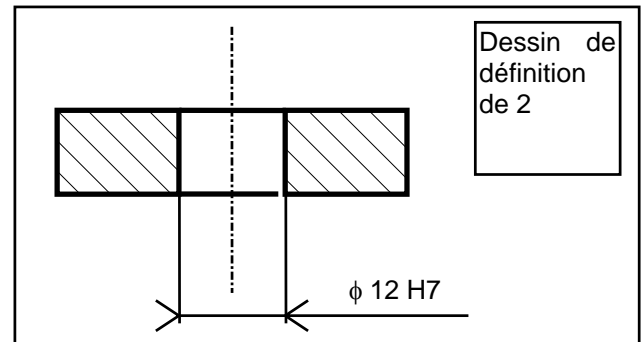
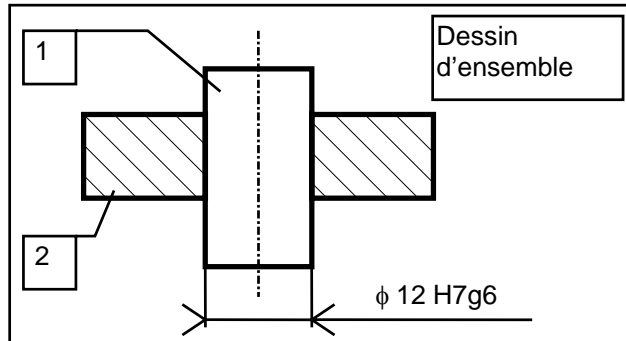
	Assemblage réalisé	Mécanique de précision	Fabrication soignée	Fabrication courante	Fabrication ordinaire	Fabrication très ordinaire	Montage	Cas d'emploi
	1. Assemblage libre				H9/d9	H11/c11	Montage à la main très facile	Pièces dont le fonctionnement nécessite un grand jeu, par suite de dilatation, mauvais alignement, portées très longues, etc.
J > 0	2. Assemblage tournant	H6/f6	H7/f7	H8/f8 H8/f7	H9/e9		Montage à la main facile	Cas ordinaire de pièces tournant dans une bague ou dans un palier (bon graissage assuré).
	3. Assemblage glissant	H6/g5	H7/g6	H8/h8 H8/g7	H9/h9		Montage à la main assez facile	Pièce en translation demandant un guidage précis ; pièce en rotation de grande précision.
J ≥ 0	4. Assemblage glissant juste	H6/h5	H7/h6	H8/h7	H9/h8		Montage à la main possible par forte pression	Assemblage fixe très précis.
	5. Assemblage légèrement dur	H6/j5	H7/j6	H8/j7			Mise en place au maillet	Démontage et remontage possibles sans détérioration ; mais l'emmanchement n'est pas suffisant pour transmettre un effort.
J ?	6. Assemblage bloqué	H6/k5 H6/m5	H7/m6				Mise en place à la masse	Démontage et remontage possibles sans détérioration ; l'emmanchement peut transmettre de faibles efforts.
J < 0	7. Assemblage serré	H6/p5 H6/r5 H6/s5	H7/p6 H7/r6 H7/s6				Mise en place à la presse ou par dilatation	Démontage impossible sans détérioration des pièces ; possibilité de transmettre des efforts importants (frettes, jantes de roues, douilles en bronze, etc. . . .).

☞ On remarquera que les assemblages très libres n'ont pas besoin d'exister en fabrication soignée.

☞ Les ajustements serrés ne peuvent qu'être réalisés en fabrication soignée.

☞ Il est fréquent que la qualité de l'arbre soit meilleure (inférieure d'une unité) que celle de l'alésage. En fabrication, il est en effet plus facile d'obtenir une bonne qualité sur une forme extérieure que sur une forme intérieure.

.6.8. Inscription sur le dessin.



.6.9. Valeurs standards

Arbres	de 0 à 3 inclus	de 3 à 6 inclus	de 6 à 10 inclus	de 10 à 18 inclus	de 18 à 30 inclus	de 30 à 50 inclus	de 50 à 80 inclus	de 80 à 120 inclus	de 120 à 180 inclus	de 180 à 250 inclus	de 250 à 315 inclus	de 315 à 400 inclus	de 400 à 500 inclus
d	- 20	- 30	- 40	- 50	- 65	- 80	- 100	- 120	- 145	- 170	- 190	- 210	- 230
e	- 14	- 20	- 25	- 32	- 40	- 50	- 60	- 72	- 85	- 100	- 110	- 125	- 135
f	- 6	- 10	- 13	- 16	- 20	- 25	- 30	- 36	- 43	- 50	- 56	- 62	- 68
g	- 2	- 4	- 5	- 6	- 7	- 9	- 10	- 12	- 14	- 15	- 17	- 18	- 20
h	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0	- 0
js	$\pm \text{IT}/2$	$\pm \text{IT}/2$	$\pm \text{IT}/2$	$\pm \text{IT}/2$	$\pm \text{IT}/2$	$\pm \text{IT}/2$	$\pm \text{IT}/2$	$\pm \text{IT}/2$	$\pm \text{IT}/2$	$\pm \text{IT}/2$	$\pm \text{IT}/2$	$\pm \text{IT}/2$	$\pm \text{IT}/2$
k	+ 0	+ 1	+ 1	+ 1	+ 2	+ 2	+ 2	+ 3	+ 3	+ 4	+ 4	+ 4	+ 5
m	+ 2	+ 4	+ 6	+ 7	+ 8	+ 9	+ 11	+ 13	+ 15	+ 17	+ 20	+ 21	+ 23
n	+ 4	+ 8	+ 10	+ 12	+ 15	+ 17	+ 20	+ 23	+ 27	+ 31	+ 34	+ 37	+ 40
p	+ 6	+ 12	+ 15	+ 18	+ 22	+ 26	+ 32	+ 37	+ 43	+ 50	+ 56	+ 62	+ 68

Assemblages de plus de 2 pièces

.Chaînes de cotes

.1. Condition fonctionnelle

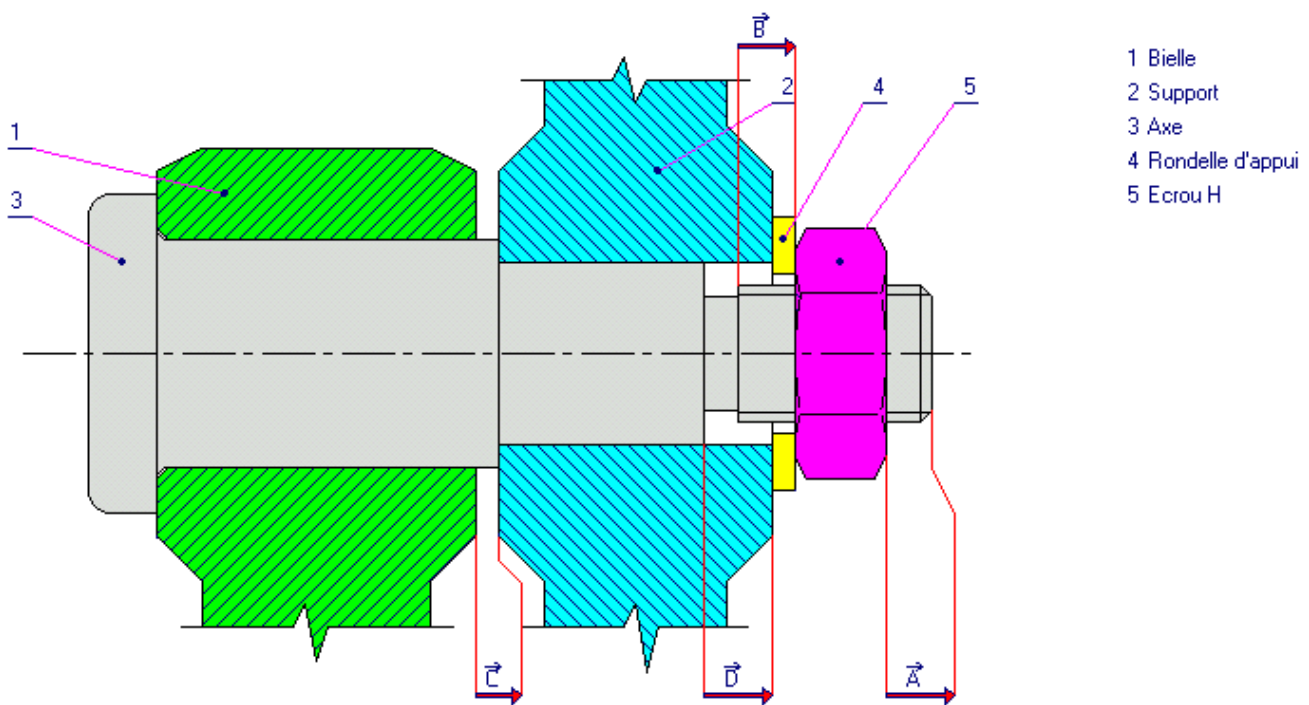
Sur le plan d'ensemble d'un mécanisme composé de plusieurs pièces, on fait apparaître des conditions nécessaires à l'obtention d'une fonction : ce sont les conditions fonctionnelles.

Chacune de ces conditions se représente par un vecteur comportant deux lignes de cotes.

☞ Ce vecteur est toujours orienté positivement vers la droite pour les conditions horizontales et vers le haut pour les conditions verticales.

Une condition fonctionnelle, qu'on appelle souvent **un jeu**, sera chiffrée par le concepteur et représente un intervalle qui peut varier de quelques microns à plusieurs millimètres suivant la fonction considérée.

Remarque : Représenter une condition fonctionnelle par un vecteur sur un dessin d'ensemble est une norme claire mais il est utile de pouvoir **décrire** cette condition par **une phrase précise**.



- Pour serrer efficacement l'écrou 5, il faut disposer d'une partie excédentaire de filetage de l'arbre de chaque côté après montage : \vec{A} et \vec{B} sont des **conditions de garde**.

- L'articulation de la bielle 1 autour de l'axe 3 nécessite un jeu axial : \vec{C} est une **condition de jeu**.

- La liaison complète démontable de l'axe 3 nécessite le « non contact » de la rondelle 4 et d'un épaulement de l'arbre : \vec{D} est une **condition de serrage**.

.2. Cotes fonctionnelles

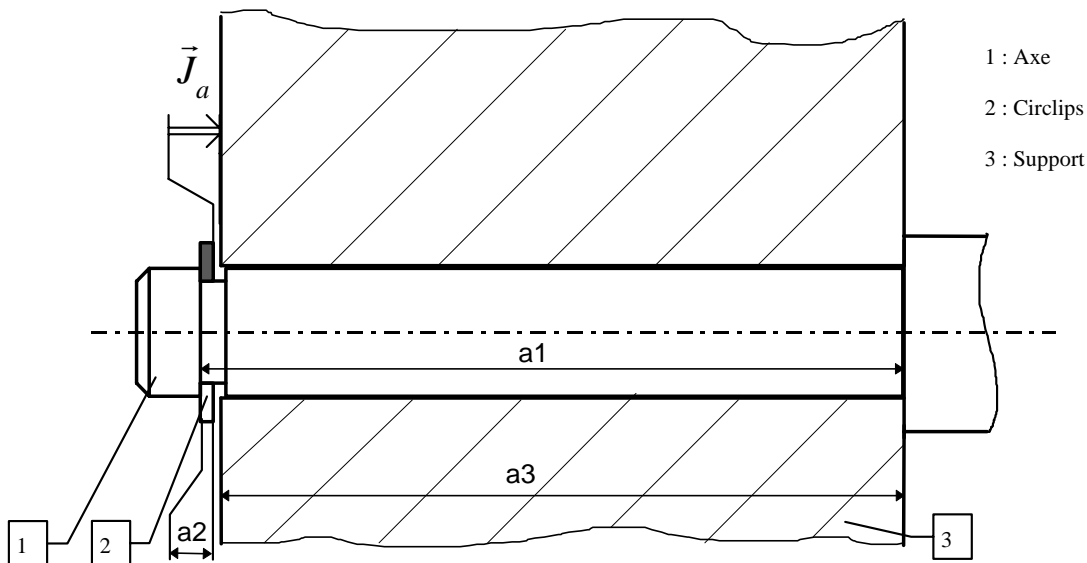
Une fois la condition fonctionnelle identifiée, il est nécessaire de déterminer les cotes qui interviennent sur la valeur de cette condition.

Ces cotes sont des dimensions **réelles, mesurables et usinables** des pièces constituant le mécanisme.

On les appelle « cotes fonctionnelles » et chacune d'elles relie deux « surfaces fonctionnelles » de la pièce.

Une « surface fonctionnelle » est une surface en contact avec une autre pièce du mécanisme, généralement perpendiculaire au vecteur condition que l'on étudie.

Exemple



Lors du montage de l'axe (1) dans le support (3), il est nécessaire de disposer d'un espace (jeu positif) J_a pour pouvoir engager le circlips (2) dans la gorge de l'axe (Condition de montage).

Il est simple de voir que les cotes fonctionnelles qui interviennent sur ce jeu sont a_1 , a_2 et a_3 , dimensions respectives des pièces (1), (2) et (3).

On constate de la même façon que l'on a, en valeur absolue :

$$« J_a = a_1 - a_2 - a_3 »$$

Mais J_a et les a_i représentent des dimensions réelles dont on peut seulement dire qu'elles doivent se trouver à l'intérieur d'un intervalle. Aussi il est plus correct de remplacer « l'équation » précédente par les deux suivantes :

$$\begin{aligned} J_{a\text{Max}} &= a_{1\text{Max}} - a_{2\text{min}} - a_{3\text{min}} \\ J_{a\text{min}} &= a_{1\text{min}} - a_{2\text{Max}} - a_{3\text{Max}} \end{aligned}$$

.3. Méthode des chaînes de cotes

Lorsqu'un mécanisme composé de nombreuses pièces nécessite une condition fonctionnelle, pour établir la liste des pièces et des cotes concernées par cette condition fonctionnelle, on utilise une méthode systématique : la « chaîne de cotes ».

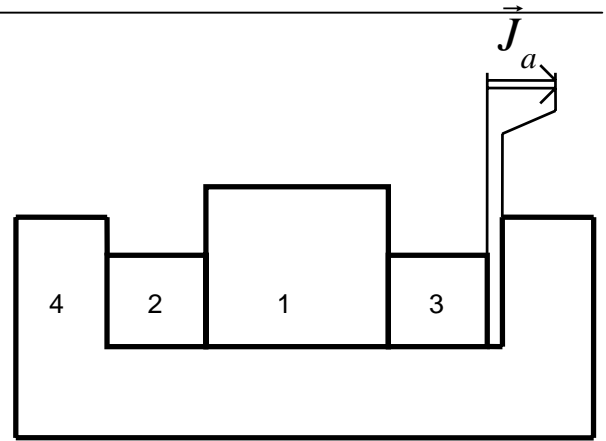
.3.1. Exemple 1 : liaison glissière.

Dans le dessin ci-contre, on souhaite réaliser une liaison glissière entre la pièce (1) et la pièce (4). Afin d'améliorer le frottement, on interpose des cales (2) et (3).

Le bon fonctionnement d'une telle liaison impose qu'il subsiste un certain jeu \vec{J}_a dans une direction perpendiculaire au déplacement.

Etablissement de la chaîne de cote.

Le but de la méthode est de trouver une **somme vectorielle** égale à \vec{J}_a , dans laquelle chacun des vecteurs représente une cote fonctionnelle d'une pièce.

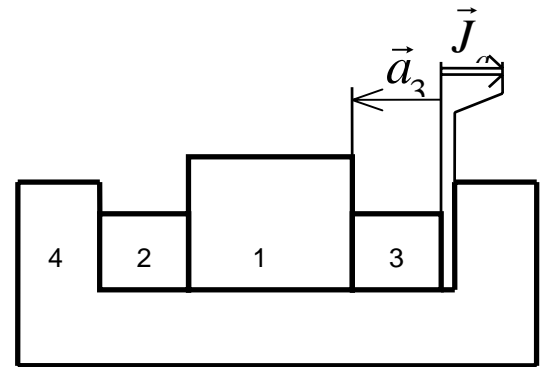


On part de la **base** du vecteur condition \vec{J}_a . La base de ce vecteur est appuyée sur la pièce (3).

On recherche une surface de contact, perpendiculaire à la direction de \vec{J}_a , entre la pièce (3) et une autre pièce.

Il existe une telle surface entre (3) et (1).

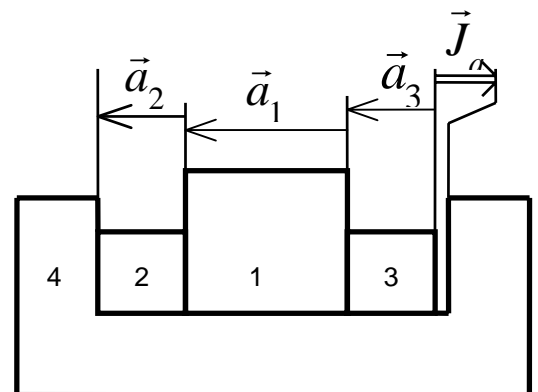
On trace le vecteur \vec{a}_3 , ainsi baptisé car il fait partie de la chaîne de cote relative à la condition \vec{J}_a , et qu'il est mesurable sur la pièce (3).



A partir du contact entre (3) et (1), on recherche une autre surface de contact entre la pièce (1) et une autre pièce.

A partir du contact entre (1) et (2), on recherche une autre surface de contact entre la pièce (2) et une autre pièce.

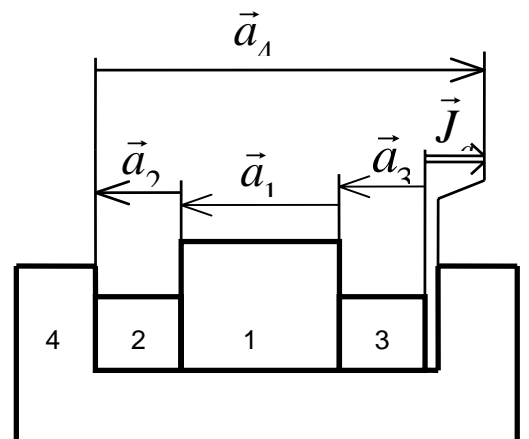
Il existe une telle surface entre (2) et (4). On trace le vecteur \vec{a}_2 , qui fait partie de la chaîne de cote relative à la condition \vec{J}_a et qui est mesurable sur la pièce (2).



On a bien ainsi réalisé une **chaîne de cotes fermée**, dont la somme vectorielle est égale à la cote condition \vec{J}_a .

Remarques importantes:

- Chaque composante de la chaîne (Vecteur \vec{a}_i) n'appartient qu'à une seule pièce : C'est une cote fonctionnelle de la pièce.
- Il n'y a **qu'une seule** cote par pièce et par chaîne.
☞ si le même indice apparaît deux fois, les deux cotes doivent pouvoir se réduire à une seule (sauf si deux exemplaires d'une pièce d'un même type apparaissent dans la même chaîne de cote). La chaîne de cotes doit toujours être **minimale**.



Equations.

L'équation vectorielle peut être projetée sur un axe \vec{x} , parallèle à \vec{j}_a , et de même direction :

$$\vec{j}_a = \vec{a}_3 + \vec{a}_1 + \vec{a}_2 + \vec{a}_4$$

en projection sur \vec{x} : $J_a = -a_3 - a_1 - a_2 + a_4$ (1)

Chacune des cotes composant la chaîne de cote est entachée d'une certaine incertitude due à la fabrication (voir p.5). On peut donc écrire :

$$J_{aMax} = a_{4Max} - a_{1min} - a_{2min} - a_{3min} \quad (2)$$

$$J_{amin} = a_{4min} - a_{1Max} - a_{2Max} - a_{3Max} \quad (3)$$

Enfin, en faisant (2)-(3), on obtient :

$$J_{aMax} - J_{amin} = (a_{4Max} - a_{4min}) + (a_{1Max} - a_{1min}) + (a_{2Max} - a_{2min}) + (a_{3Max} - a_{3min})$$

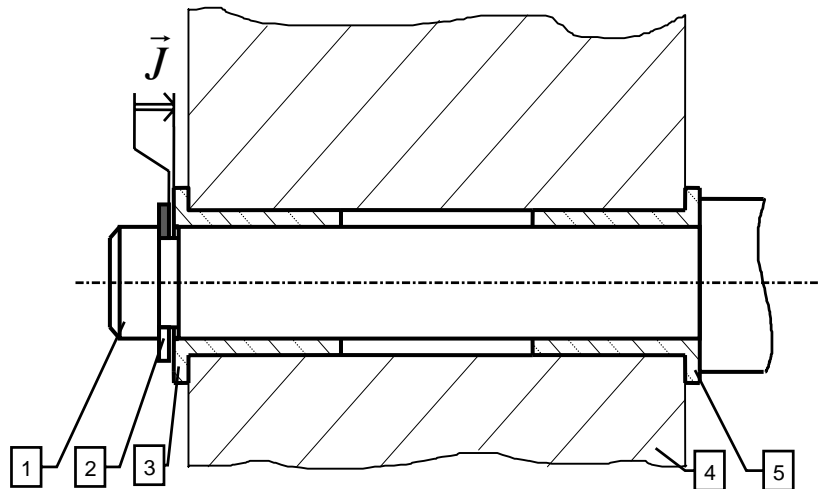
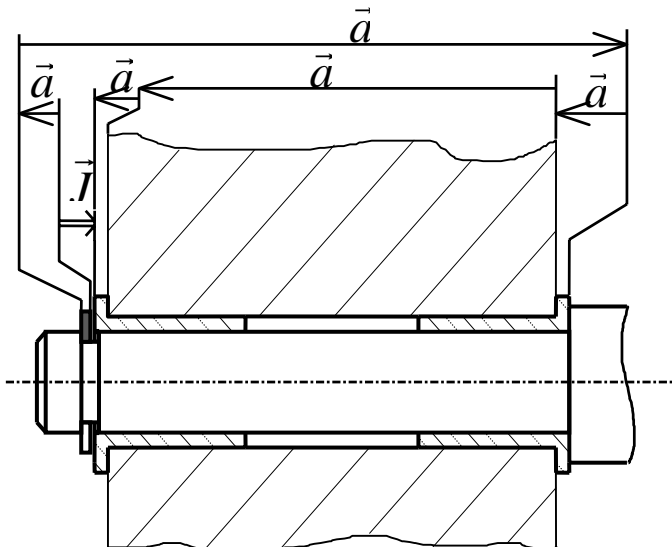
On écrit, en généralisant :

$$\Delta J_a = \sum_{i=1}^n \Delta a_i$$

.3.2. Exemple 2 : liaison pivot.

Dans l'exemple qui suit, le raisonnement est conduit *jusqu'à son terme*, c'est à dire jusqu'au report des données issues de la cotation fonctionnelle sur les dessins de définition de pièces.

Tracé de la chaîne de cotes :



écriture des équations :

$$J_a = a_1 - a_2 - a_3 - a_4 - a_5 \quad (1)$$

donc :

$$J_{a_{Max}} = a_{1_{Max}} - a_{2_{min}} - a_{3_{min}} - a_{4_{min}} - a_{5_{min}} \quad (2)$$

et

$$J_{a_{min}} = a_{1_{min}} - a_{2_{Max}} - a_{3_{Max}} - a_{4_{Max}} - a_{5_{Max}} \quad (3)$$

$$ITJ_a = \sum_{i=1}^n ITa_i \quad (4)$$

Données :

$a_4 = 102 \text{ mm}$

☞ le fabricant de circlips donne $a_2 = 1 \text{ h} 11 \Rightarrow a_2 = 1^{+0}_{-0,06}$

☞ le fabricant de bagues donne $a_3 = a_5 = 3 \text{ js} 14 = 3 \pm 0,125$

Démarche du concepteur :

- Je choisis la condition fonctionnelle (en fonction de l'expérience que j'ai ou de celle de l'entreprise).
- Attention de ne pas choisir ITJ trop petit, sinon on aura $a_{i_{min}} > a_{i_{Max}}$!
- J'examine les conséquences de mon choix sur les cotes de la chaîne.

Application de la démarche du concepteur :

Choix : $J_a = 1 \pm 0,5$

On choisit de répartir l'intervalle de tolérance disponible de façon égale sur les cotes de la chaîne. (celles qui ne sont pas déjà tolérancées)

$$\begin{aligned} (4) \Rightarrow ITJ_a &= ITa_1 + ITa_2 + ITa_3 + ITa_4 + ITa_5 \\ 1 &= ITa_1 + 0,06 + 0,25 + ITa_4 + 0,25 \\ ITa_1 + ITa_4 &= 0,44 \quad \text{donc } ITa_1 = ITa_4 = 0,22 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (1) \Rightarrow 1 &= a_1 - 1 - 3 - 102 - 3 \\ a_1 &= 110 \end{aligned}$$

et

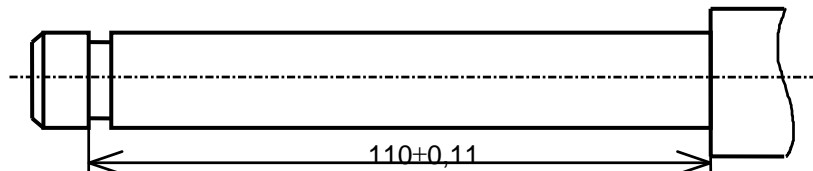
$$a_1 = 110 \pm 0,11$$

$$\begin{aligned} (2) \Rightarrow 1,5 &= 110,11 - 0,94 - 2,875 - a_{4_{min}} - 2,875 \\ a_{4_{min}} &= 101,92 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (3) \Rightarrow 0,5 &= 109,89 - 1 - 3,125 - a_{4_{Max}} - 3,125 \\ a_{4_{Max}} &= 102,14 \end{aligned} \quad \text{donc}$$

$$a_4 = 102^{+0,14}_{-0,08}$$

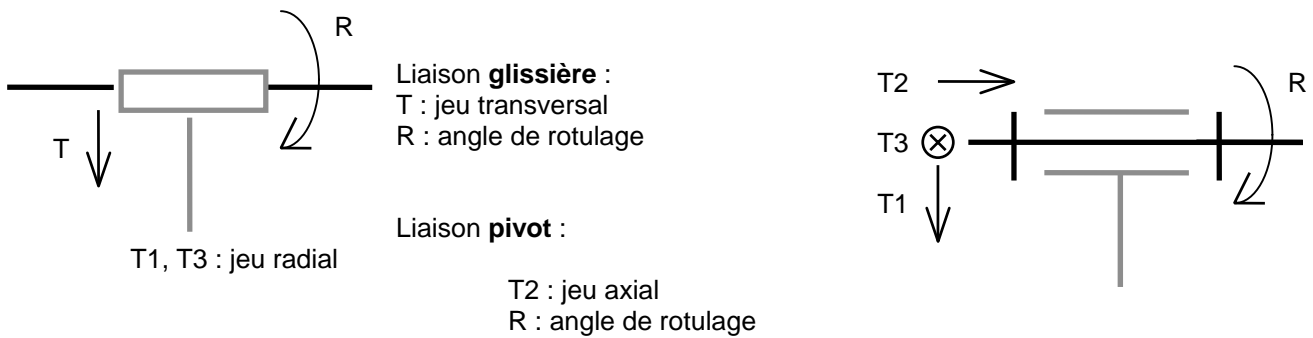
Report de la cotation issue de la cotation fonctionnelle sur le dessin de (1).



.4. Critères de choix des conditions fonctionnelles

Les performances géométriques du mécanisme serviront à définir les valeurs maximales des conditions fonctionnelles. Elles dépendent des performances attendues du mécanisme (précision adaptée à l'usage).


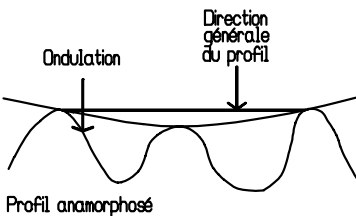
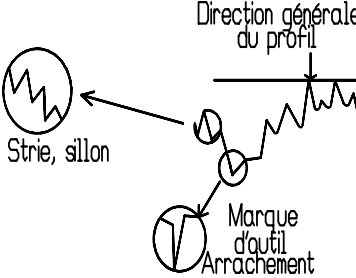
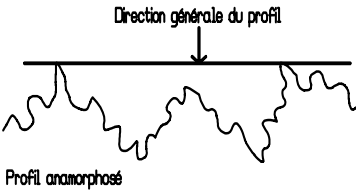
Exemple : Le tableau suivant donne les valeurs des déplacements maximaux que peut avoir un solide par rapport à un autre, en fonction de la nature du mécanisme (type d'utilisation) et des mouvements relatifs autorisés de l'un par rapport à l'autre.



Liaisons	glissière		pivot		
	T (mm)	R (°)	T1,T3 (mm)	T2 (mm)	R (°)
catégories					
horlogerie					
machines-outils précises	0,003	0,005	0,002	0,003	0,005
machines-outils classiques	0,005	0,01	0,005	0,005	0,01
moteur automobile					
robots de précision	0,08	0,05	0,04	0,06	0,1
bicyclette					
engins de chantier	0,2	0,1	0,2	0,08	0,15
outillage amateur à main	0,5	0,5	0,2	0,1	0,3
appareils électro-ménagers	0,3	0,5	0,2	0,2	0,5
matériel agricole	1	0,5	0,5	0,3	1
menuiserie					
assemblage de meubles	2	1	0,5	0,5	2,5

.Etats de surface

.1. Décomposition en 4 ordres

ORDRE	DESIGNATION		ILLUSTRATION	SURFACE SPECIFIEE	
				Dessin d'exécution	Signification par rapport à la fonction
1	ECART DE FORME Exemple : Ecart de - rectitude - circularité - etc ...			PRESCRIPTION GEOMETRIQUE (voir NFE 04-552)	1er et 2ème ordre • influent sur : - roulement.. - étanchéité dynamique et statique. - etc ...
2	ONDULATION			SYMBOLISATION DES ECARTS GEOMETRIQUES Du 2ème au 4ème ordre	- usure - grippage • diminuent: - durée de vie des organes - etc ...
3	R U G O S I	STRIE, SILLON (périodique ou pseudopériodique)		(voir NF 05-016)	3ème et 4ème ordre influent sur : - écoulement des fluides - étanchéité dynamique et statique - revêtement
4	T E	Arrachement Marque d'outil (apériodique)			- dépôt électrolytique - résistance aux efforts alternés ...
Somme des écarts du 1er au 4ème ordre	PROFIL TOTAL			Ensemble des défauts de surface dont l'analyse permet de déterminer leur influence spécifique sur une fonction donnée	Il ne sert à rien d'affiner la rugosité si l'écart de forme et l'ondulation ne sont pas réduits au niveau admissible pour une fonction donnée.

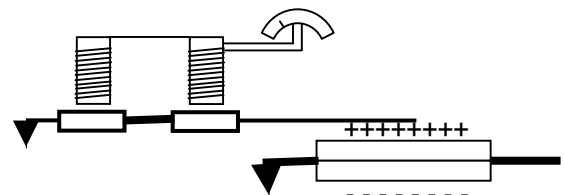
.2. Origine des défauts.

N° ORDRE	SURFACE REELLE			
	Origine des écarts au cours de l'élaboration		Moyens d'évaluation des surfaces mesurées par exploration.	
	- Procédé d'usinage - Matériau usiné	- Machine - Installation	D'une surface globale ou limitée	D'un profil total ou partiel
1	- Déformation de la pièce • Pendant l'usinage, indépendamment du procédé. • Après l'usinage, dépendant du matériau (libération des tensions internes).	- Défaut de bridage. - Flexion des éléments de la machine. - Qualité du guidage des éléments coulissants. - Usure des organes.	- Portée au marbre. - Tampon. - Bague. - Machine à mesurer - Appareil de mesurage d'écart de forme. - Etc . . .	- PALPAGE en discontinu • lunette autocollimatrice. - Comparateur. - Machine à mesurer, etc. - « PALPAGE » en continu : • Appareil électronique à capteur avec référenced mesure (palpeur-touche ou aiguille)
2	- Fraisage (pas de l'ondulation, par exemple, avance par tour de fraise) • inclinaison de la fraise (en bout). • Mauvais affûtage. • Mauvais réglage des dents (en bout, en roulant). • Rectification : mauvais diamantage de la meule.	- Vibrations de basses fréquences : • de la pièce, • de l'outil. • des deux, dues aux flexions, mauvais guidage et équilibrage des éléments de machine, et également à l'insuffisance de l'installation de l'isolement passive et active.	- Echantillon de comparaison visio-tactile : estimation de l'ondulation et de la rugosité des pièces fraisées. - Microscope stéréoscopique - Appareil de mesurage d'écart de forme.	- Microscope à coupe optique - Appareil électronique à capteur, avec référence de mesure. Palpeur : • touche . . . • aiguille.
3 rugosité	- Procédé par enlèvement de copeaux : STRIES, SILLONS, dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil ; à l'avance par tour de la matière ou de la meule, etc . . . - Procédé de formage à froid ou à chaud : BOSES et CRATERES juxtaposés.	- Vibrations de hautes fréquences (causes analogues à celles énumérées ci-dessus). - Installation de lubrification : - Lubrifiant : nature , qualité lubrifiante, action de	- Echantillon de comparaison visio tactile : estimation de la rugosité. - rugomètre : • pneumatique.	- Microscope à coupe optique. - Microscope interférentiel. - Appareil électronique à capteur : (palpeur-aiguille)
4 rugosité	- Géométrie d'affûtage de l'outil : qualité de la meule. - Hétérogénéité, plasticité du matériau usiné (fonte : aluminium à forte teneur en silicium).	- mode d'arrosage. - filtre : efficacité du système (entre autres, fréquences de nettoyage).	• capacitif - Microscope stéréoscopique. - Microscope électronique	

.3. Mesure

Différentes technologies existent : Induction

piezo électrique



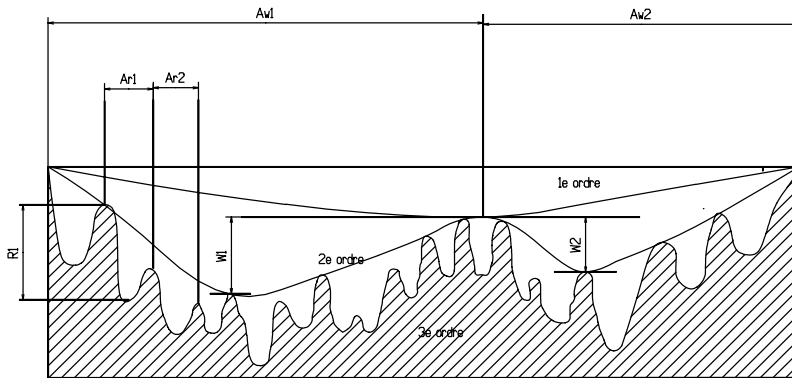
Pour mesurer l'un ou l'autre des défauts, il est nécessaire de filtrer la mesure.

Filtrage mécanique : le patin glisse sur la pièce pour suivre les ondulations (ordre 2), pendant que la pointe pénètre dans les stries (ordre 3 et 4). On ne mesure alors que la rugosité (ordre 3 et 4).



Filtrage électronique avec un filtre passe haut pour mesure les défauts d'ordre 2, et un filtre passe bas pour mesurer la rugosité.

4. Critère d'états de surface



La figure ci-contre définit les différents critères d'ondulation et de rugosité, les définitions sont données pour **n motifs caractéristiques sur une longueur d'évaluation L**.

Critère d'ondulation W (2^{ème} ordre):

- profondeur moyenne

$$W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i$$

- pas moyen

$$A_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_w)_i$$

unités en microns.

Critère de rugosité R (3^{ème} ordre):

- profondeur moyenne

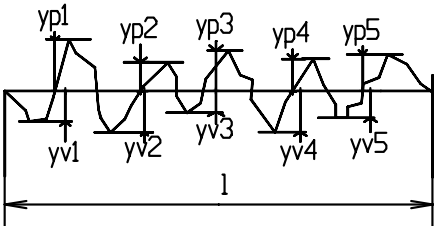
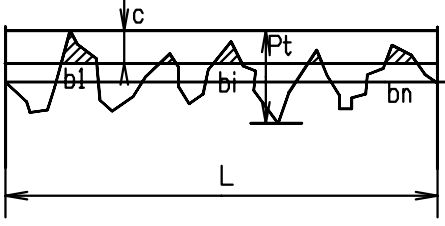
$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$$

- pas moyen

$$A_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_R)_i$$

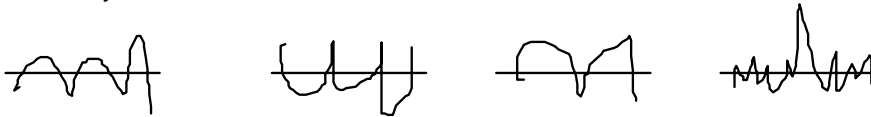
Critères statistiques liés à la ligne moyenne (NFE 05-015)

SYMBOLE	INTITULE ET DEFINITION	ILLUSTRATION
Rt	Hauteur maximale de rugosité : Rt C'est le plus grand des Ry avec Ry : distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux pour une longueur (l).	
Rmax	Maximum de la hauteur des irrégularités du profil : Rmax C'est le plus grand des Rmaxj avec Rmax pris entre une saillie et un creux consécutif.	
Rp	Hauteur moyenne de saillie : Rp $R_p = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_{pj}$ avec Rpj, distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (l)	
Ra	Ecart moyen arithmétique du profil : Ra $R_{aj} = \frac{1}{l} \int_0^l y / dx$	

Rz	Hauteurs des irrégularités sur 10 points : Rz avec $Y_{pi} = Y_p, \dots, Y_{p5}$ hauteur des cinq saillies les plus hautes $Y_{vi} = Y_v, \dots, Y_{v5}$ profondeur des cinq creux les plus bas $R_{zi} = \frac{\sum_{i=1}^5 Y_{pi} + \sum_{i=1}^5 Y_{vi}}{5}$ $R_z = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_{zj}$	
(Tp)c	Taux de longueur portante : (Tp)c $(Tp)c = \frac{\eta p}{L}$ avec $\eta p = b_1 + b_2 + \dots + b_n$	

Remarque : Mise en garde sur le critère Ra:

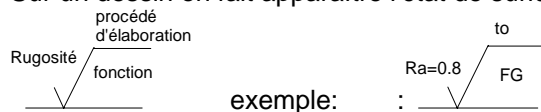
- Ra est le critère de rugosité le plus connu des concepteurs et des fabricants car c'est un paramètre de comparaison,
- Cependant lors de la mesure, l'opérateur doit choisir un filtre "passe-haut" adapté pour obtenir des résultats significatifs, l'interprétation des mesures reste délicate,
- Profil ayant même Ra,



- Ra ne donne pas une idée physique du profil mesuré,
- Il est préférable d'utiliser des paramètres liés au motif tel que **R** et **W**.

5. Spécification et choix des états de surface au BE.

Sur un dessin on fait apparaître l'état de surface sous la forme du signe suivant:



Fraisage			Rectification							Forgeage					Moulage			
Alésage	Brochage	En bout	En roulant	Plane	Cylindrique	Rodage	Tournage	Polissage	Super finition	Estampage	Etirage	Filetage	Forgeage	A froid	A chaud	Sable	Coquille	Matricage
al	br	trb	frr	rcp	rcc	rd	to	po	sf	es	et	fl	fo	laf	lac	mos	moc	ma

.6. Choix et évaluation des critères.

SURFACE		Critères									
		Fonction appliquée à la surface		Profil de rugosité			Profil d'ondulation				Profil total
		Désignation	Abréviation	R	Rmax	AR	W	Wmax	Wt	AW	Pt (Tp)c
CONTACT DE DEUX PIECES	Avec déplacement relatif	Glissement (lubrifié)	FG	●			≤0,8R			■	●
		Frottement à sec	FS	●		■		●		■	
		Roulement	FR	●			≤0,3R	●		■	■
		Résistance au matage	RM	■		■	■			■	●
		Frottement d'un fluide	FF	●		■				■	
	Assemblage	Etanchéité dynamique	avec joint	ED	●	■	■	≤0,6R	●	■	
			sans joint	ED	■	●		≤0,6R			●
		Etanchéité statique	avec joint	ES	■	●		≤ R		■	
			sans joint	ES	■	●		≤ R		●	
	Fixe	Ajustements fixe avec contraintes	AC	■							●
		Adhérence (collage)	AD	●							■
Surfaces indépendant es	Avec contraintes	Outil (face de coupe)	OC	■		■				●	
		Résistance aux efforts alternés	EA	■	●	■					■
	Sans contraintes	Résistance à la corrosion	RC	●	●						
		Revêtement (peinture)	RE			■				■	
		Dépôt électrolytique	DE	●		●					
		Mesure	ME	●			≤ R				
		Aspect	AS	●		■	■			■	

● Critères principaux : spécifier au moins l'un d'eux.

■ Critères secondaires : à spécifier éventuellement selon la fonction de la pièce

Tableau de « valeurs indicatives des critères Ra et R » fonction de la qualité ISO souhaitée.

Valeurs de Ra recommandées (d'après S. ENACHE)

Valeurs de R

Diamètre nominal en (mm)	Qualité ISO *				
	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10
1 - 3	0,20 - 0,32	0,32 - 0,63	0,50 - 0,80	0,63 - 1,00	1,25 - 2,00
3 - 6	0,25 - 0,40	0,40 - 0,63	0,63 - 1,00	0,80 - 1,25	1,60 - 2,50
6 - 10	0,32 - 0,50	0,50 - 0,80	0,80 - 1,25	1,00 - 1,00	2 - 3,20
10 - 18	0,40 - 0,63	0,63 - 1,00	1,00 - 1,60	1,25 - 2,00	2,50 - 4,00
18 - 30	0,40 - 0,80	0,80 - 1,25	1,25 - 2,00	1,60 - 2,50	3,20 - 5,00
30 - 50	0,50 - 0,80	1,00 - 1,60	1,25 - 2,00	1,60 - 2,50	4,00 - 5,00
50 - 80	0,63 - 1,00	1,00 - 1,60	1,60 - 2,50	2,00 - 3,20	4,00 - 6,30
80 - 120	0,63 - 1,00	1,25 - 2,00	2,00 - 3,20	2,50 - 4,00	5,00 - 6,30
120 - 180	0,80 - 1,25	1,25 - 2,00	2,50 - 3,20	2,50 - 4,00	6,30 - 8,00
180 - 260	1,00 - 1,60	1,60 - 2,50	2,50 - 4,00	3,20 - 5,00	6,30 - 10,0
260 - 360	1,00 - 1,60	1,60 - 2,50	3,20 - 5,00	3,20 - 5,00	8,00 - 12,5
360 - 500	1,25 - 2,00	2,00 - 3,20	3,20 - 5,00	4,00 - 6,30	10,00 - 12,5

* Le premier nombre correspond à la qualité des arbres, le second à celle des alésages

QUALITE ISO *	
< 7	≥ 8
$\frac{IT}{2}$	$\frac{IT}{4}$

Tableaux de « valeurs

indicatives de R et Ra » fonction des procédés de fabrication employés (CNOMO E40 72.114N et « guide du dessinateur ».

NB : il existe d'autres tableaux permettant d'évaluer Rt en fonction des procédés de fabrication.

Valeurs nominales de « R » en μm			50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1
Ordre de grandeur de la tolérance totale d'usinage la plus serrée en μm			100	60	35	20	14	10	7	5	3	2
P	D	Grenaillage										
		Rabotage										
R	E	Sciage										
O		Oxycoupage										
C	R	Fraisage										
E	E	en bout										
D	A	en roulant										
E	L	Tournage										
S	I	Alésage à l'outil										
S		Alésage à l'alésoir										
P	A	Perçage au foret										
O	T	Rectification										
S	I	Plane										
S	O	Cylindrique										
S		Rodage										
I	N	Electro - érosion										
B		Meulage fin										
L		Limage										
E		Pierrage main										
S		Grattage										
		Réalisations usuelles										
		Réalisations exceptionnelles										

Cotation de fabrication

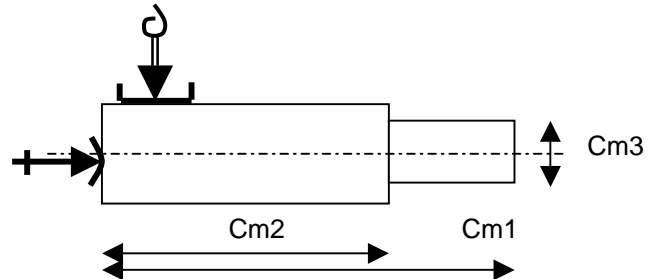
.1. Les différentes cotes de fabrication

.1.1. Cote machine C_m

Ce sont des cotes séparant une surface de mise en position (ou l'axe de la pièce en tournage) et la surface usinée.

La cote machine est obtenue par réglage de l'outil par rapport au référentiel de mise en position de la pièce.

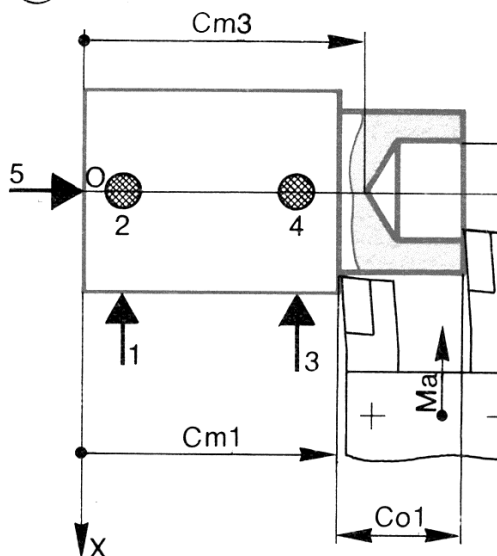
Exemple : les cotes C_{m1} , C_{m2} et C_{m3} sont des cotes obtenues par réglage de l'outil. Ce sont des cotes machines.



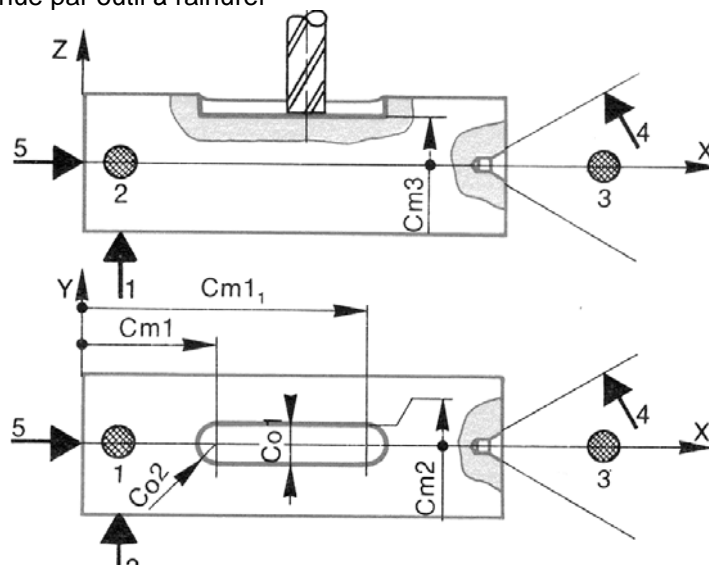
.1.2. Cote outil : C_o

La forme de la surface usinée est définie par la forme de l'outil.

Exemple 1 : Diamètre obtenu par perçage et par un outillage comprenant deux outils liés ensemble.



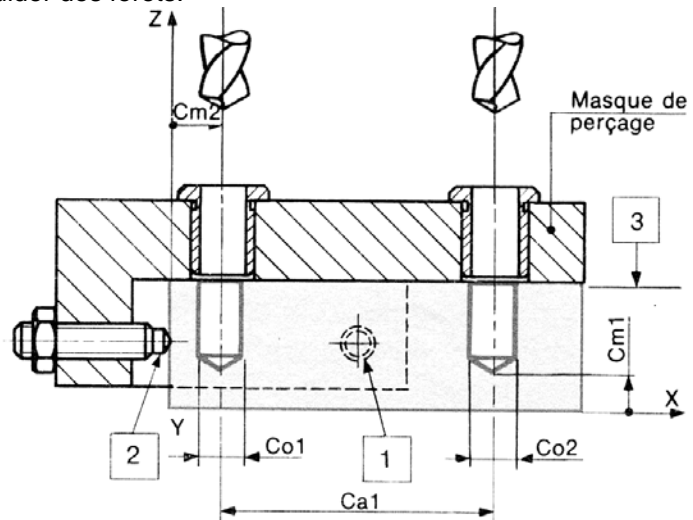
Exemple 2 : largeur d'une rainure obtenue par outil à rainurer



1.3. Cote appareil : Ca

Les cotes sont définies directement par le montage d'usinage.

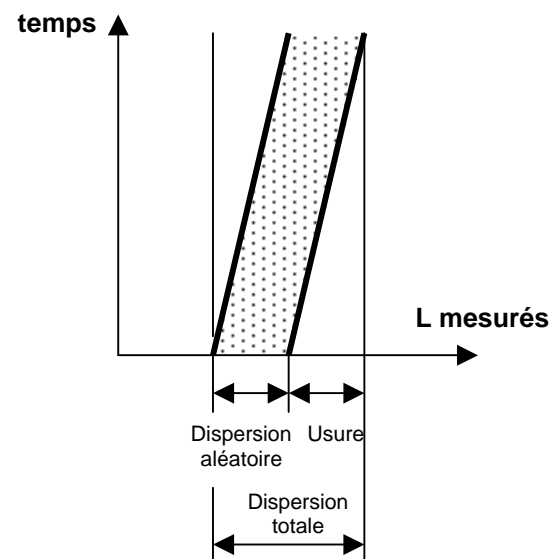
Exemple : les canons de perçage pour guider des forets.



2. Les causes de dispersion

Dispersion lors de l'usinage

- Dispersion aléatoire : dues aux vibrations, aux défauts de mise en position de la machine...
- Dispersion systématique : due à l'usure de l'outil : les valeurs mesurées sur une série de pièce varient linéairement, de façon prévisible.

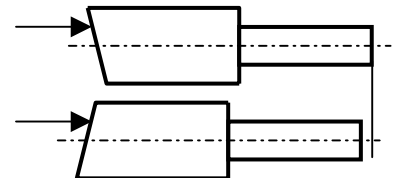


Les défauts de mise en position de la pièce dans son montage entraînent une dispersion. Les cause de dispersions sont nombreuses :

- manière dont l'opérateur fait accoster les pièces,
- qualité de la surface de référence,
- présence d'impureté sur la face...

Valeurs de référence

- Accostage d'une surface usinée sur une butée fixe : $\Delta l = 0,01$
- Accostage d'une surface brute sur une butée fixe : $\Delta l = 0,3$ à $0,5$
- Montage entre pointe : $\Delta l = 0,03$



3. Transfert de cote

Le Bureau d'étude réalise la cotation du dessin de fabrication en fonction de la cotation fonctionnelle. La position des cote n'est donc pas toujours appropriée pour la fabrication (voir les exemples ci-dessus). Le cas le plus favorable, est lorsqu'il y a concordance entre les cotes fabriquées et les cotes du bureau d'étude : on appelle ces cotes les cotes directes.

Le transfert de cote est le moyen de calcul permettant de déterminer les cotes utiles à la fabrication.

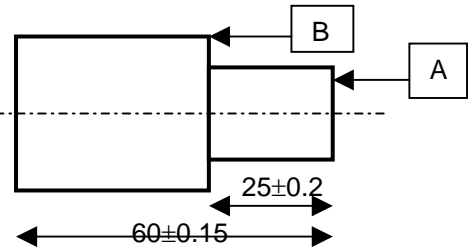
On remplace la cote que l'on veut transférer par un vecteur condition, puis on trace la chaîne de cote correspondante. Il ne reste qu'à résoudre les équations issues de la chaîne de cote.

Exemple

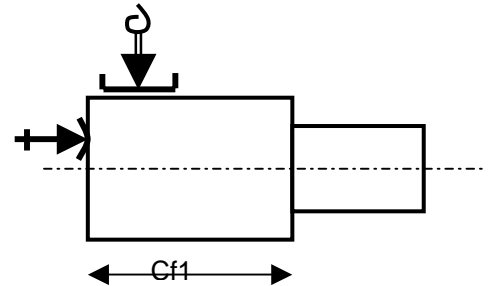
Les cotes du bureau d'étude sont définies ci-contre.

Les surfaces A et la surface B ne sont pas usinées dans la même sous phase. La cote de 25 ± 0.2

ne peut donc pas être réalisée directement.



L'usinage de la surface B se fait avec la prise de pièce ci-contre : La cote que l'on règle sur la machine est la cote fabriquée : $Cf1$, il faut la calculer. La cote que l'on veut transférer est mise en condition fonctionnelle.

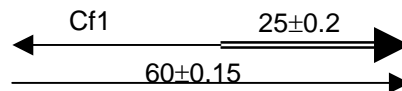


$$60 - Cf1_{\text{moyen}} = 25$$

$$\text{et } IT_{Cf1} + 0,3 = 0,4$$

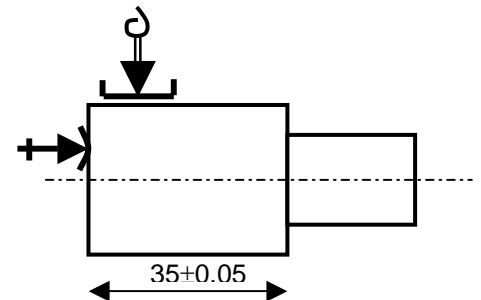
$$\text{d'où : } Cf1_{\text{moyen}} = 35$$

$$\text{et } IT_{Cf1} = 0,1$$



Le dessin du bureau des méthodes devient donc pour cette phase.

La dispersion de mise en position sur une surface usinée étant de 0.01 mm, il ne reste que 0.04 mm de dispersion pour l'usinage de la surface.



Remarque

La tolérance de la cote de fabrication (Cf) est nécessairement plus faible que la tolérance de la cote du bureau d'étude.

Il n'est donc pas toujours possible de réaliser le transfert !

Dans ce cas ;

- il faut étudier avec vos collègues du bureau d'étude pour essayer de changer la cotation
- ou trouver un montage d'usinage qui soit capable de mettre en position la pièce de façon à satisfaire la cote bureau d'étude. Dans notre exemple la solution serait de mettre une butée escamotable sur la surface A.

[illegible]

Chapitre 4

Obtention de pièce par déformation

P. DEPEYRE

Sommaire

. Généralité sur la déformation	5
.1. Avantages liés au forgeage	5
.2. Notion de déformation.....	5
.2.1. Courbe de traction	5
.2.2. Déformation plastique.....	7
.3. Le corroyage.....	7
.4. Fibrage.....	8
.5. Matériaux forgeables.....	8
.6. Technologie des machines	8
.6.1. Moutons et pilons.....	8
.6.2. Presses.....	8
.6.3. Comparaison de mode de forgeage	9
.7. Forge libre	9
.7.1. Principe	9
.7.2. Domaine d'application	9
.7.3. Formes de pièces obtenues.....	9
.8. Matricage, estampage	10
.8.1. Principe	10
.8.2. Domaine d'application	10
.8.3. Matériaux des outils	11
.9. Forgeage par refoulement	11
.9.1. Principe	11
.9.2. Domaine d'application	11
.10. Emboutissage.....	11
.10.1. Principe	11
.10.2. Domaine d'application	11
.11. Filage.....	11
.11.1. Principe	11
.11.2. Outil	12
.11.3. Domaine d'application	12
.12. Calibrage à froid	12
.13. Choix d'un procédé.....	12
.14. Conception des pièces matricées.....	13
.14.1. Dépouille	13
.14.2. Rayon de raccordement.....	13
.14.3. Surépaisseurs d'usinage	14
.14.4. Plan de joint	14

Bibliographie

Pratique du forgeage - Jean Husson – PYC edition

Procédé de formage – J.Triouliyre – delagrave

Forge par matriçage – Syndicat National de l'estampage et de la forge

Généralité sur la déformation

.1. Avantages liés au forgeage

Caractéristiques

Certaines caractéristiques mécaniques sont améliorées (en particulier l'allongement). Le phénomène est particulièrement accentué pour les alliages d'aluminium. Un aluminium corroyé a des propriétés équivalentes à un acier recuit.

Homogénéité

Sous l'effet du choc ou de la pression, le métal est écrasé et s'écoule entre les outils dans une direction perpendiculaire à celle de l'effort exercé. Il y a homogénéisation et orientation de la structure dans cette direction privilégiée.

Certains éléments qui se trouvaient hors de la solution au moment de la coulée, peuvent se dissoudre ou se répartir plus finement.

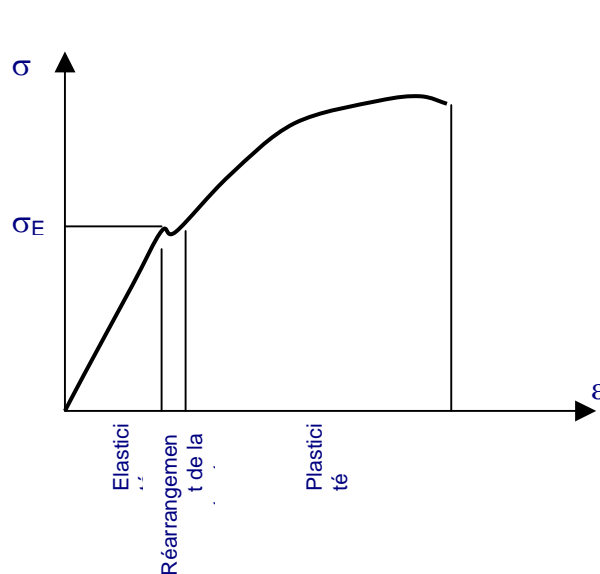
Esthétique

L'aluminium matricé ne nécessite pas de ré-usinage des surfaces non fonctionnelles. La peau est propre, avec un état de surface inférieur à 0,8 micron. Les aubes de turbines sont matricées sans ré-usinage.

.2. Notion de déformation

.2.1. Courbe de traction

La norme définit un essai de traction sur une éprouvette, qui permet de caractériser le matériau.



Généralités

$$\sigma = \frac{F(t)}{S_0} \quad \text{et} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L(t)}{L_0}$$

Elasticité : dans ce domaine

- déformation axiale : $\sigma_{xx} = \varepsilon_{xx} E$ (E module de Young)
- déformation radiale : $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} \nu$ (ν coefficient de Poisson = 0,25 à 0,3 pour les aciers courants)
- la déformation est réversible.
- σ_E : Limite élastique du matériau

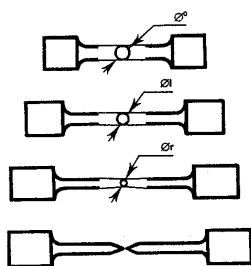
Plasticité

Dans ce domaine,

- les déformations ne sont plus linéaire en fonction de l'effort,
- la déformation est permanente.

- La fin de la courbe est marquée par le phénomène de striction.

.2.1.1. Striction

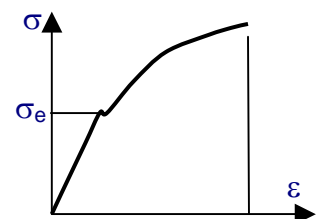


La striction est un point de diminution rapide du diamètre. Ceci explique la décroissance de la courbe de traction juste avant la rupture (le calcul

de $\sigma = \frac{F(t)}{S_0}$ étant fait pour S_0).

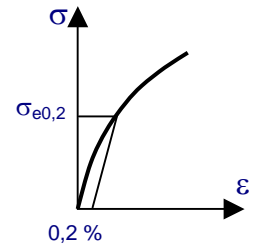
Pour éviter ce phénomène on peut établir la courbe

de traction corrigée $\sigma = \frac{F(t)}{S(t)}$: ci-contre.



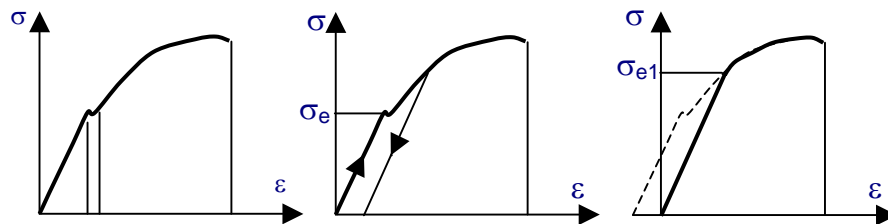
.2.1.2. Matériau sans domaine élastique

Pour les matériaux dont la limite entre le domaine élastique et le domaine plastique n'est pas facile à repérer (fonte), la limite élastique R_e (ou σ_e) est remplacée par $\sigma_{e0,2}$ mesurée en traçant une droite tangente à la courbe de traction à l'origine pour une valeur de 0,2 % de la valeur de l'allongement au moment de la rupture.



.2.1.3. Ecrrouissage

Ce phénomène apparaît pour un matériau à qui l'on a fait subir une déformation plastique. Il correspond à une augmentation de la limite élastique de σ_e à σ_{e1} . L'écrouissage disparaît si l'on fait un recuit (ou restauration).



Application : tube de chauffage en cuivre.

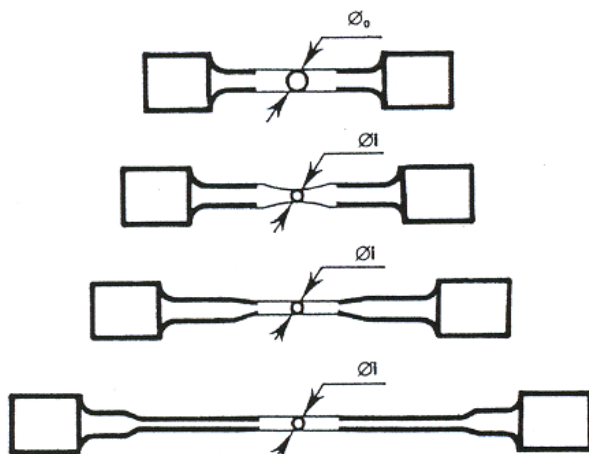
.2.1.4. Mémoire des déformations

Un matériau qui subi une déformation plastique en traction puis en compression voit sa limite élastique diminuée de façon importante : effet Bauschinger.

Il est donc indispensable de connaître l'historique d'un matériau pour l'utiliser dans une application sensible.

.2.1.5. Superélasticité

Certains matériaux ont la caractéristique de propager la striction initiale sur toute la longueur de la pièce avant rupture. La déformation peut atteindre 1 500 %.



Composition particulière

Elément	composition	Allong. %	θ°
Zinc	22%Al	1 500	250-270
Magnésium	5,5% Zn , 0,5% Zr, 2% Th, 0,5%mg	1 000	270-310
Aluminium	5% Mg , Cu, Zn, Si, Li, Mn, Zr, Nb, Ta, Ni	1 000	350-475
Cuivre	15% Ni, 25%Zn, 13%Mn, 40% Zn	500	428-538 500-600
Acier inox.	0,04%C, 26%Cr, 6.5%Ni	600	870-980

- Une vitesse de déformation lente : 10 % / min
- Une température $> 0,5 T_f$ (T_f température de fusion)

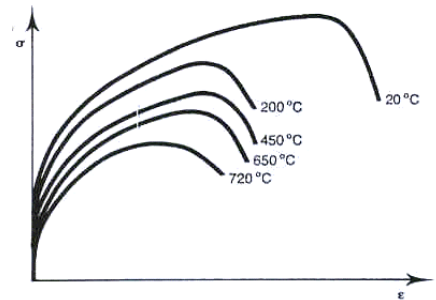
2.2. Déformation plastique

2.2.1. Influence de la température

La température a une forte influence sur les contraintes dans le matériau lors d'une déformation.

Nous ferons la distinction entre deux modes opératoires :

- déformation à froid où $\theta < 0,5.\theta_f$
- et la déformation à chaud où $\theta > 0,5.\theta_f$



2.2.2. Déformation à froid

C'est le domaine athermique : les phénomènes liés à l'agitation moléculaire (dilatation) peuvent être négligés.

Il n'y a pas de diffusion, de recristallisation après formage.

Le formage à froid engendre :

- Une augmentation de la limite élastique par écrouissage
- Un excellent état de surface
- Un intervalle de tolérance serré
- Des contraintes internes (qui peuvent être éliminées par restauration)

2.2.3. Déformation à chaud

Les efforts pour déformer le matériau sont plus faibles, mais la température influence les caractéristiques dimensionnelles de la pièce.

- état de surface médiocre
- qualité faible

3. Le corroyage

Le corroyage correspond à l'orientation des dendrites du matériau. C'est le phénomène le plus important de la forge.

Le taux de corroyage est le rapport : S_0/S_1 : S_0 et S_1 étant les sections avant et après forgeage.

L'orientation du corroyage entraîne certains changements dans le matériau :

- Création d'un matériau anisotrope. Il faut faire attention au sens de corroyage lors de l'utilisation des bruts.
- Amélioration de certaines propriétés physiques du matériau, dans le sens du corroyage.

Caractéristique	Dans le sens du corroyage	Perpendiculairement au corroyage
Résistance à la striction	++	--
Allongement	++	--
Résistance à la rupture	=	=
Limite élastique	=	=
Résistance à la fatigue	++	++
Résilience	++	--

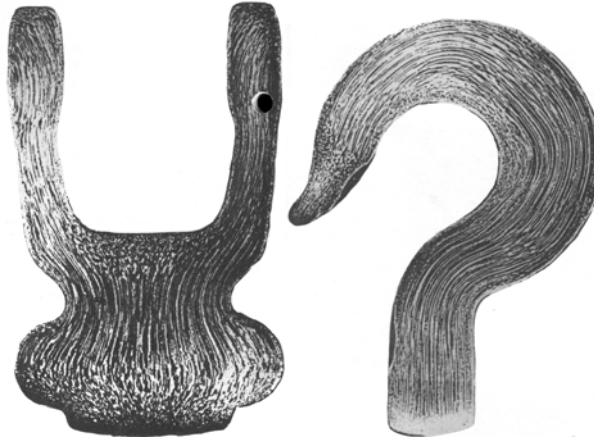
4.

Fibrage

Le fibrage est le terme désignant l'orientation des impuretés comprises dans le matériau.

Le fibrage n'est donc pas une bonne chose en soit, puisqu'il met en valeur le fait que le matériau est impur.

Par contre, en attaquant les impuretés avec de l'acide, on peut visualiser le sens du fibrage, et par la même occasion le sens du corroyage, qui lui est une caractéristique fondamentale de la forge.



Remarque : Les matériaux étant de plus en plus purs, il devient de plus en plus délicat de le mettre en évidence. Cela ne veut pas dire que le taux de corroyage ait diminué pour autant !

.5. Matériaux forgeables

- Aciers dont le % en carbone est inférieur à 0,5
- Tous les alliages d'aluminium. Le choix est f
- Fonction des contraintes mécaniques (voir exemples de matriçage page 10).

.6. Technologie des machines

Il existe deux types de machines : les engins de frappe (pilons) et les engins de pression (presse).

La presse en déformant la matière plus doucement, évite la formation de fissures (criques) et permet donc la fabrication de pièces compliquées.

Les pilons conviennent bien aux pièces assez uniformes.

.6.1. Moutons et pilons

Les plus simples fonctionnent avec la pesanteur. Le marteau est remonté par un système variable suivant le constructeur, puis est lâché sur la pièce. L'énergie développée est de l'ordre de 5 à 50 KJ.

Pour augmenter cette énergie on utilise un accélérateur, sous forme d'un piston à air ou à vapeur.

Pour une énergie toujours plus grande, on utilise la contre frappe : alors que le marteau descend, la pièce est projetée vers le haut : énergie développée ; 80 à 800 KJ.

.6.2. Presses

Le marteau est entraîné vers le bas par un vilebrequin. Celui-ci est animé par un moteur hydraulique.

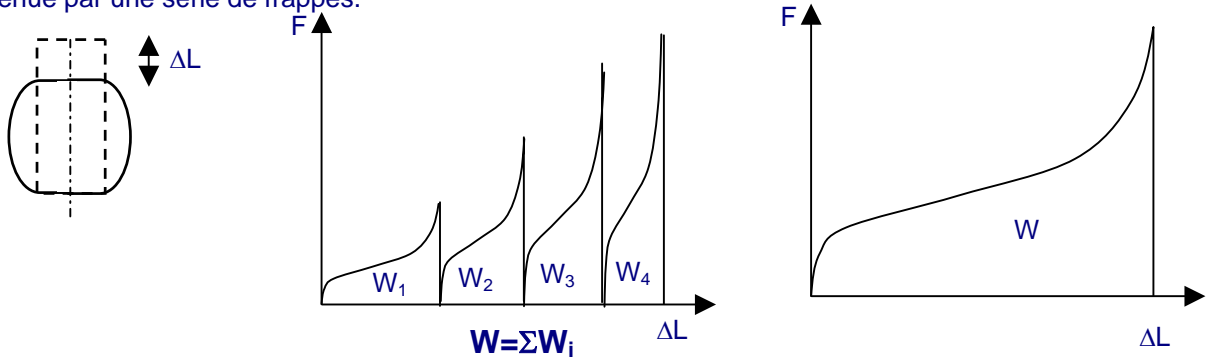
Pour donner une énergie importante, on fixe sur l'arbre moteur un volant d'inertie.

Force développée : 6000 à 120 000 KN.

.6.3.

Comparaison de mode de forgeage

Dans le cas des presses, la pièce est obtenue en un coup, alors que dans le cas de pilons, la pièce est obtenue par une série de frappes.



.7. Forge libre

.7.1. Principe

La matière est déformée suivant une direction. Aucun outillage spécifique n'est utilisé, les formes obtenues seront donc simples. La qualité de la pièce dépend de la compétence du forgeron.

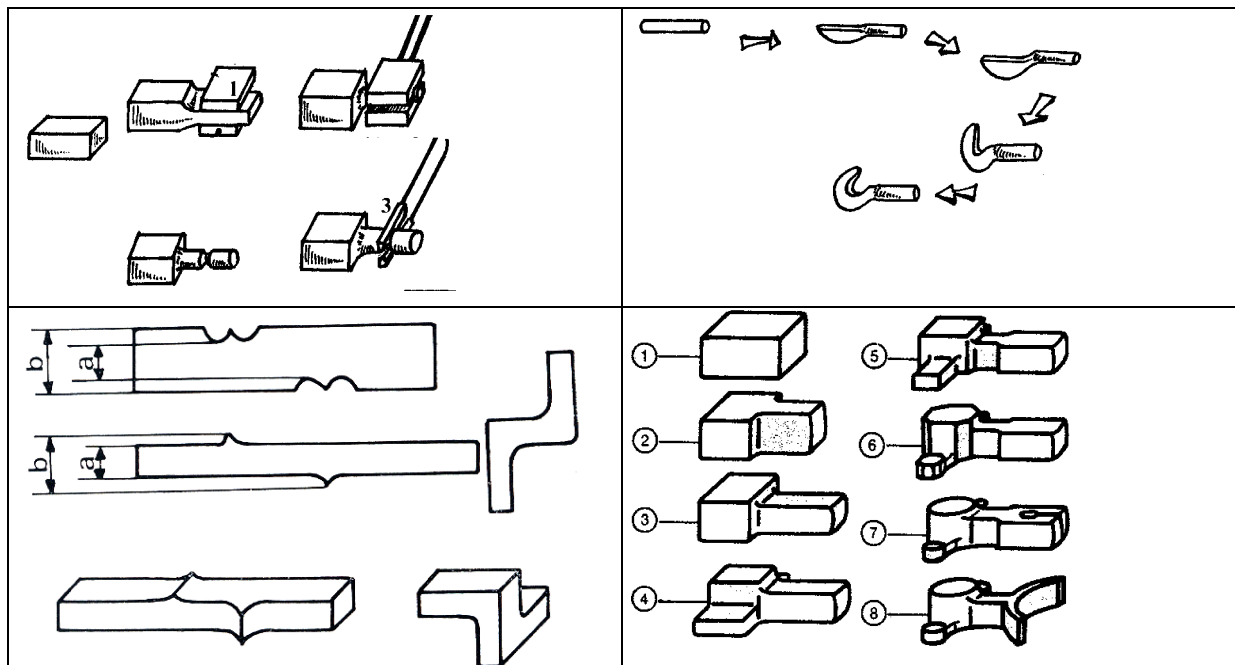
.7.2. Domaine d'application

Les pièces peuvent peser d'un kilo à plusieurs centaines de kilos (utilisation d'un manipulateur). La forge libre est utilisée pour les pièces unitaires ou petites séries.

.7.3. Formes de pièces obtenues

La forge libre travaille à volume constant. Le travail du forgeron consiste donc à déplacer la matière vers les zones massives.

Voici quelques exemples de gammes de forge.



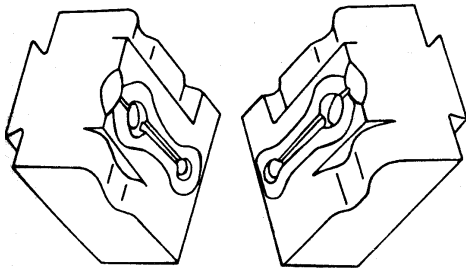
.8. Matricage, estampage

.8.1. Principe

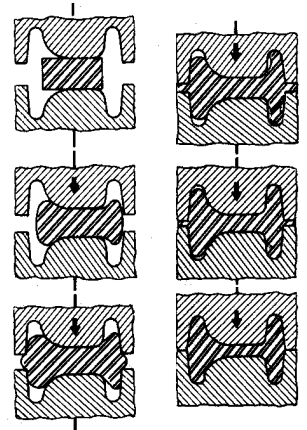
- L'estampage consiste à obliger un morceau de matière appelé lopin, porté à une température $\theta > 0,5.\theta_f$ à épouser la forme de l'empreinte en creux dans des blocs d'acier appelé outillage.

L'outillage est mis en contact plus ou moins rapidement par des machines

- de choc $V > 1\text{m/s}$ (marteau pilon)
- ou de pression $V < 1\text{m/s}$ (presse mécanique)



Le matricage est identique dans son principe, mais ce terme est réservé aux alliages non ferreux (aluminium, cuivre...).



.8.2. Domaine d'application

Pièces de taille moyenne de 2 grammes à 20 kg, massive ou mince, nécessitent une résistance particulière à la fatigue ou à la résilience.

	<p>Chapeau de palier de vilebrequin. 0,1 kg 2014 – T6 Les chapeau moulé en coquille n'était pas fiables.</p>		<p>Châssis de patin à roulette 0,314 kg 2014 – T6</p>
	<p>Support de montage moteur. 5,6 kg 6061 – T6</p>		<p>Jante de camion 27,6 kg 6061 – T6 Légèreté et fiabilité.</p>
	<p>Support de moteur de hors-bord. 0,462 kg 6082 – T6</p>		<p>Maillon de convoyeur grande vitesse 1,2 kg 7075 – T6</p>
	<p>Bielle de frein de camion 4 kg 6061 – T6 Pièce de sécurité Le matricage offre la résistance et la qualité.</p>		<p>Levier de bogie de remorque 15,8 kg 7075 – T6</p>

.8.3.

Matériaux des outils

Estampage : les matrices sont en Z38CDV5 ou 60 NCD11

Extrusion : les matrices sont en 60 ncd11 ou Z200C12

.9. Forgeage par refoulement

.9.1. Principe

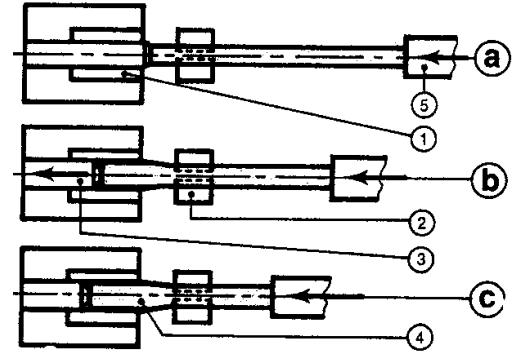
La pièce est maintenue par deux demi-matrices, l'une est mobile et vient pousser le lopin sur l'autre demi-matrice.

La longueur maximale refoulée ne peut être trop grande, de risque de voir la pièce flamber lors de l'opération. L'opération sera donc souvent en plusieurs passes.

Pour limiter le risque de flambage, on peut, par induction, par effet joule, ne chauffer qu'une partie de pièce.

.9.2. Domaine d'application

Pièces longues présentant une excroissance au bout (soupape)



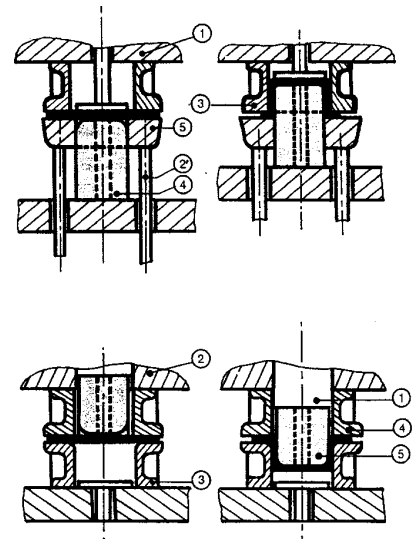
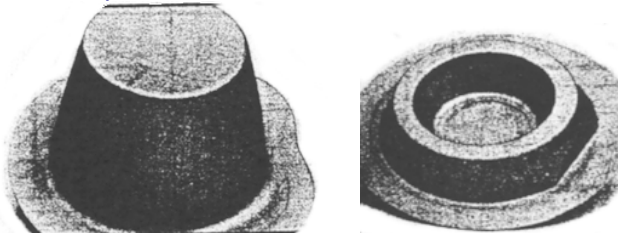
.10. Emboutissage

.10.1. Principe

La pièce (une tôle mince) est maintenue par des serres flancs (3). La forme est obtenue par descente d'un poinçon (5) dans la tôle.

.10.2. Domaine d'application

Toutes les pièces minces



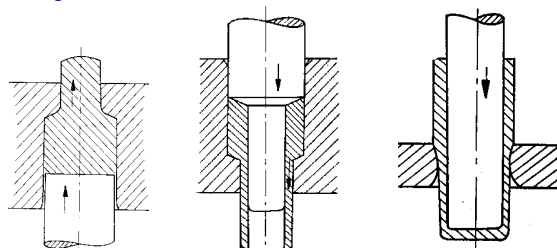
.11. Filage

.11.1. Principe

Le lopin, introduit dans un conteneur, est comprimé par le poinçon. Sous l'effet de la pression, la matière s'écoule au travers de la filière.

On distingue deux sortes de filage :

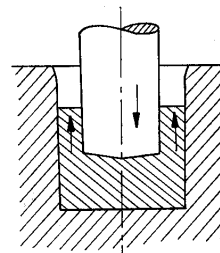
Filage



Direct

avec aiguille

Filage inverse



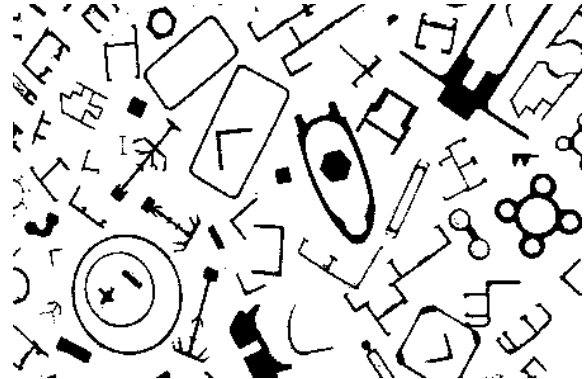
.11.2. Outil

L'outil est un disque d'acier, présentant un évidement dont la section correspond à la section de la pièce réalisée. Il est soumis à des contraintes élevées ($1\,000\text{N/mm}^2$).

L'aiguille vient pousser le métal dans la filière, et évide le centre de la pièce.

.11.3. Domaine d'application

Les formes réalisées peuvent être très complexes. C'est le mode de fabrication privilégié pour les profilés aluminium (pour les gros profilés aciers (poutre), on préfère le laminage) Voici un échantillon de différentes sections obtenues.

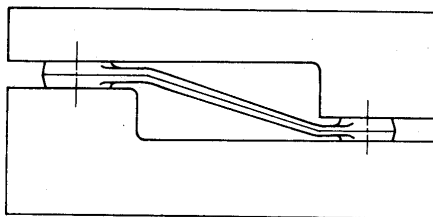


.12. Calibrage à froid

Ce procédé permet une mise à épaisseur précise.

Il consiste à écraser certaines parties de la pièce entre deux outils plats.

Pour ce procédé, on utilise souvent des presses à grenouillère qui offre des efforts importants pour une course faible.

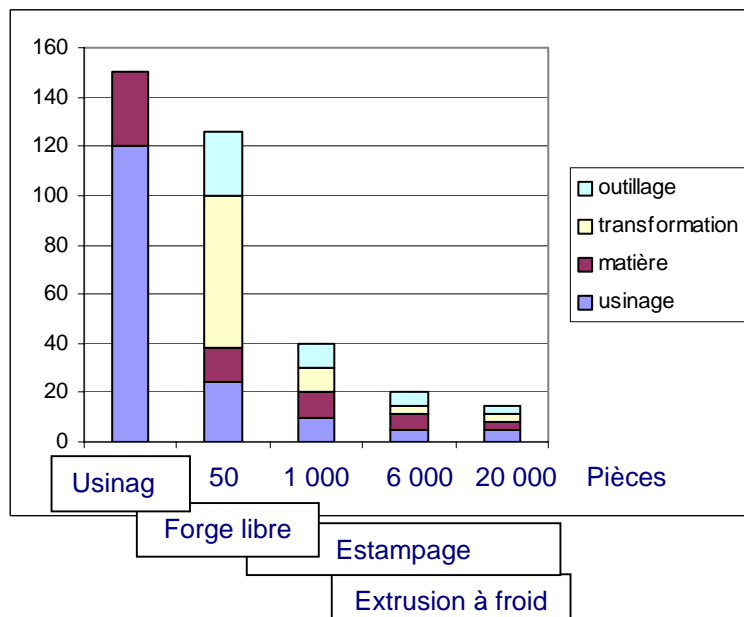


Précisions : pour une pièce de 20 à 30 mm IT = 0,2mm

.13. Choix d'un procédé

Coût comparatif d'une pièce entre les différents procédés en fonction de la série.

Le choix de l'usinage est valable pour les petites séries, car il n'y a pas d'outillage spécifique, par contre, dès que la série devient importante, le gain de temps et de matière devient prépondérant et permet des baisses de coût significatives.



.14. Conception des pièces matricées

Lorsque le concepteur décide d'utiliser le forgeage, il est nécessaire de concevoir la pièce pour optimiser :

- Les surépaisseurs d'usinage
- La forme des matrices
- La durée de vie des matrices.

L'outillage mis en oeuvre pour l'estampage est soumis à de nombreuses règles qu'il faut respecter pour optimiser la durée de vie des outils.

.14.1. Dépouille

Pour que le métal remplisse la gravure, et pour qu'il en sorte facilement, il faut que les flancs de la pièce soient obliques : c'est ce qu'on appelle la dépouille.

On prend le plus souvent

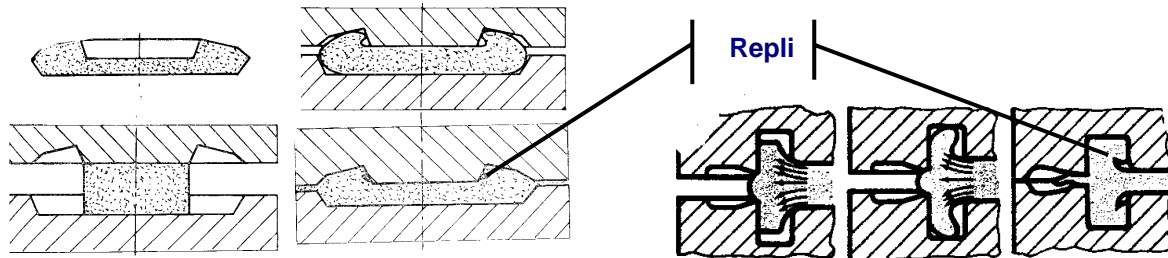
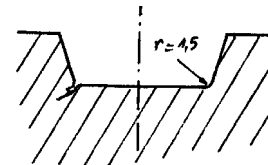
- entre 3 et 6 degrés pour les dépouilles extérieures
- entre 6 et 10 degrés pour les dépouilles intérieures (risque de serrage de la pièce lors du refroidissement).

.14.2. Rayon de raccordement

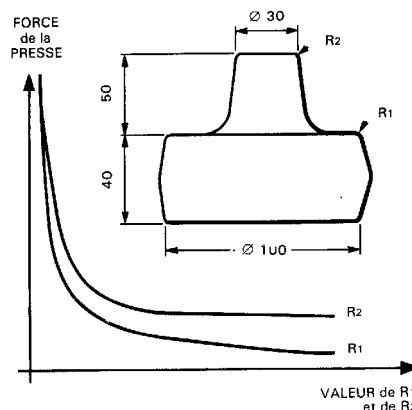
.14.2.1. Conséquences d'un rayon trop petit

Dans une gravure, il faut éviter les angles vifs différents problèmes peuvent se poser

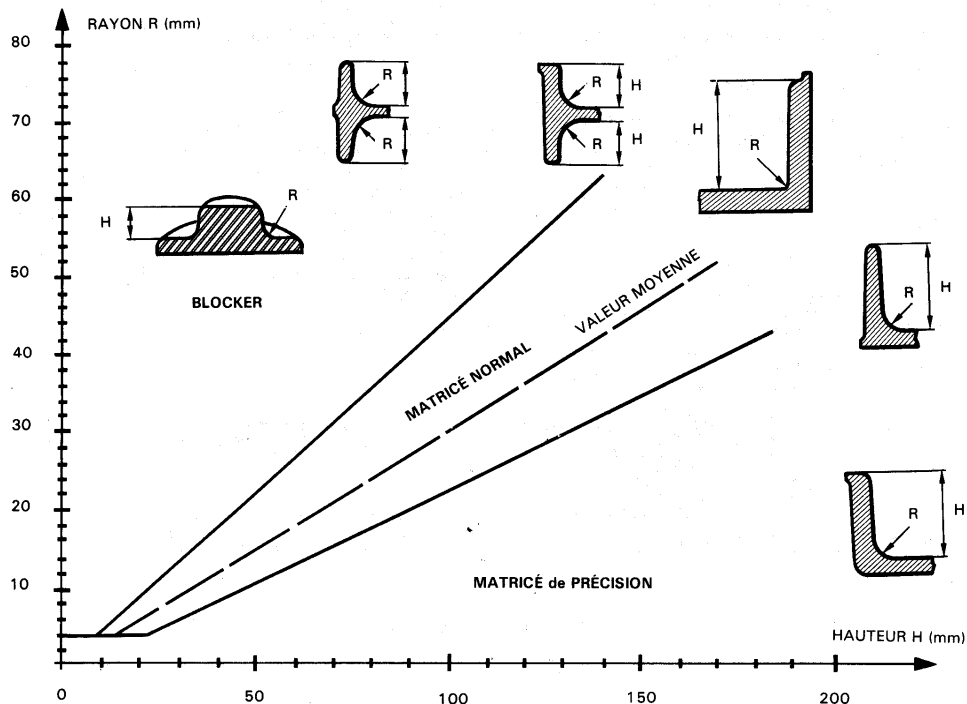
- Durée de vie de l'outil diminuée si les rayons sont petits (risque de fissuration des outils).
- Risque de formation d'un pli (ou repli) lors de la déformation.
Pour l'éliminer : augmenter les rayons et faire des passes d'ébauche.



- Efforts nécessaires pour remplir la matrice augmentée.



.14.2.2. Choix des rayons de raccordement



.14.3. Surépaisseurs d'usinage

Il faut prévoir sur toutes les surfaces fonctionnelles, une surépaisseur d'usinage prenant en compte

- La qualité des surfaces de la pièce (zone hétérogène)
- Les défauts de positionnement d'une matrice par rapport à l'autre (défaut de déport)
- Le copeau mini des outils

La sur-épaisseur est au minimum égale à 1 mm.

.14.4. Plan de joint

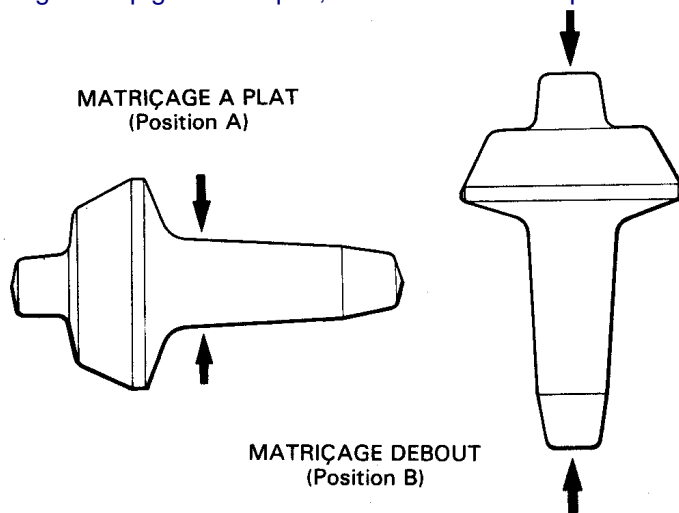
Pour remplir parfaitement les matrices, il est nécessaire de prévoir une bavure sur tout le tour du plan de joint. Un logement doit être prévu dans les outils. L'épaisseur de la bavure est réduite au voisinage de la pièce, pour faciliter l'opération d'ébavurage.

Le plan de joint doit être choisi de façon à

- Permettre l'extraction de la pièce
- Orienter les dendrites en fonction de l'utilisation future de la pièce.
- Optimiser la quantité de matière utilisée
- Faciliter la fabrication des outils

Exemple 1

Forge d'un pignon conique ; deux solutions sont possibles

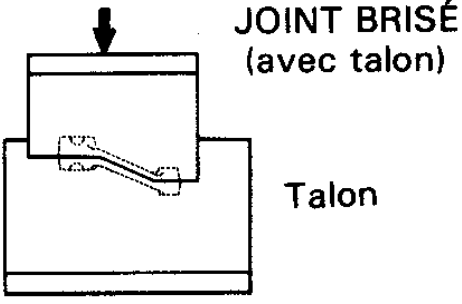
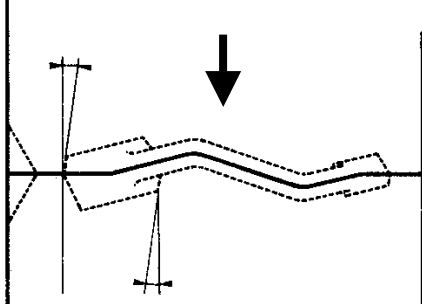


Solution	Fabrication des matrices	Longévité des matrices	Défaut de départ	corroyage
A			Le défaut de départ va se retrouver sur toute la longueur de la pièce, et créera un choc lors de l'usinage.	
B	Plus simple car réalisée en tournage plutôt qu'en fraisage	Meilleur car le plan de joint est plus faible. La matrice est plus massive.	Mieux placé, la pièce étant par la suite usinée, le choc sur l'outil du au défaut de départ n'aura lieu que sur quelques mm.	Le corroyage sera axisymétrique, la qualité des dents n'en sera que meilleur.

La solution B est nettement préférable à la solution A.

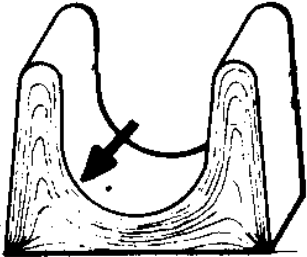
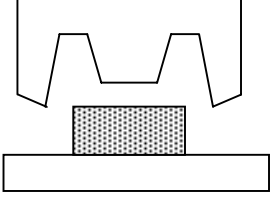
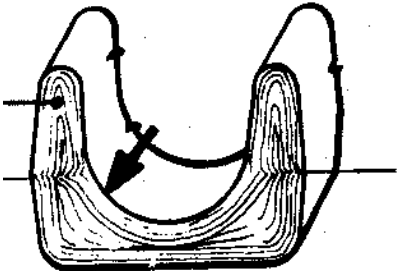
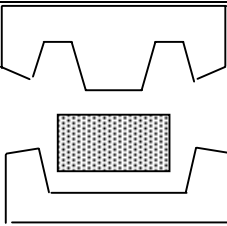
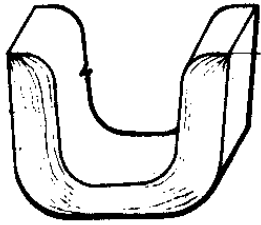
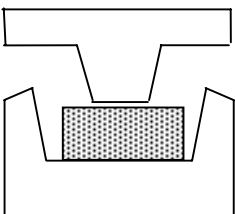
Exemple 2

Matricage d'une bielle coudée.

Position du plan de joint	remarque
 <p>JOINT BRISÉ (avec talon)</p> <p>Talon</p>	<p>Plan brisé.</p> <p>Lors de la frappe, un effort latéral important apparaît, du fait de l'inclinaison de la pièce. Pour compenser cet effort, et guider la matrice, on ajoute des talon sur la matrice fixe.</p>
 <p>Joint basculé.</p>	<p>Joint basculé.</p> <p>Ce basculement de la bielle permet d'équilibrer la pièce lors de la descente de la matrice.</p> <p>Il faut être vigilant à respecter les angles de dépouille.</p> <p><u>Solution à préférer</u></p>

Exemple 3

Influence du plan de joint sur le corroyage

Solution	remarques
	<p>Plan de joint en bas de la pièce</p> <p>Le fibrage est fonction de la position de la bavure. Il y a risque de plis au niveau de la flèche.</p> <p>Solution à éviter</p> 
	<p>Plan de joint au milieu de la pièce</p> <p>Il y a toujours un risque de pli.</p> <p>Solution à éviter</p> 
	<p>La pièce est guidée lors de sa déformation Le corroyage est bien orienté. Il n'y a pas de risque de plis.</p> 

Exemple 4

Bielle

